



Modèles spectraux pour les surfaces imprimées : approches directes et problématiques inverses

Mathieu Hébert

► To cite this version:

Mathieu Hébert. Modèles spectraux pour les surfaces imprimées : approches directes et problématiques inverses. Optique / photonique. Université Jean Monnet - Saint-Etienne, 2016. tel-01376935

HAL Id: tel-01376935

<https://hal.science/tel-01376935>

Submitted on 5 Oct 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MÉMOIRE

présenté par

Mathieu Hébert

Maître de Conférences
à l'Université Jean Monnet de Saint-Etienne
et à l'Institut d'Optique Graduate School

pour obtenir le diplôme d'Habilitation à Diriger des Recherches
de l'Université Jean Monnet de Saint-Etienne

Modèles spectraux pour les surfaces imprimées : approches directes et problématiques inverses

Soutenu le 1er février 2016 devant le jury composé de :

Christine Andraud (Muséum National d'Histoire Naturelle, rapporteur)

Brian Stout (Université d'Aix-Marseille, rapporteur)

Claude Rozé (Université de Rouen, rapporteur)

Roger D. Hersch (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, invité)

Sabine Süsstrunk (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, invitée)

Philipp Urban (Fraunhofer IGD, invité)

Thierry Fournel (Université de Saint-Etienne, Tuteur)

Pierre Chavel (CNRS, Institut d'Optique – Graduate School, Tuteur)



2016

Mathieu Hébert

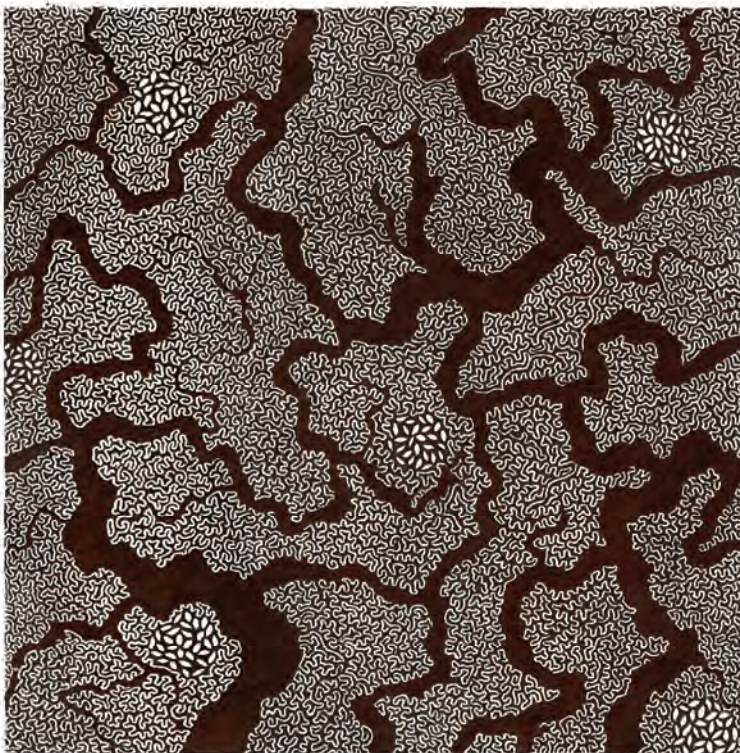
Maître de Conférences
à l'Université Jean Monnet de Saint-Etienne
et à l'Institut d'Optique Graduate School

**Modèles spectraux pour les surfaces imprimées :
approches directes et problématiques inverses**

2016

Remerciements

Je dois le chemin parcouru jusqu'à ce mémoire à la chance d'avoir eu autour de moi tant de personnes chaleureuses et passionnées qui m'ont offert chaque jour leur enthousiasme, leur confiance, leur générosité, leur amitié. Je profite de cette occasion pour exprimer mon infinie reconnaissance à Roger Hersch, Pierre Chavel, Thierry Fournel et Jean-Marie Becker qui m'ont guidé et soutenu durant toutes ces années. J'espère pouvoir entretenir aussi longtemps que possible l'héritage de leur talent et de leur exigence, qu'ils me font l'honneur de partager. Le plaisir quotidien de ce métier vient des échanges incessants d'idées souvent fructueuses, toujours porteuses, quelle que soit la distance géographique, avec mes confrères de l'enseignement et de la recherche : Lionel Simonot, Raphaël Clerc, Serge Mazauric, Renée Charrière, tous mes anciens collègues de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne dont Romain Rossier et Isaac Amidror, et mes collègues actuels de l'Institut d'Optique et du Laboratoire Hubert Curien, dont Thierry Lépine et Alain Trémeau. J'aime l'énergie créatrice et consciencieuse des jeunes chercheurs que j'ai eu le plaisir d'accompagner : Jacques Machizaud, Juan Martinez, David Nébouy, Laure Alston, Victorien Raulot, et des étudiants que j'ai pu suivre de près ou de loin à l'EPFL, à l'Institut d'Optique, dans les différents parcours du master Optique-Image-Vision, ou à CPE-Lyon. Je remercie chaleureusement mes collègues des services techniques et administratifs, en particulier Anthony Cazier, Caroline Ponte, Cathel Tourmente, Dominique Colombier, Françoise Chavel et Julie Debiesse pour tout ce qui a été possible grâce à eux, et ce que nous avons pu faire ensemble, toujours dans une humeur revigorante. Je tiens aussi à remercier les partenaires industriels avec lesquels j'ai eu la chance de collaborer, lesquels m'ont ouvert leurs portes et leurs savoir avec une grande générosité, en particulier Joseph Leibenguth et Jean-Luc Lesur de Gemalto, Christophe Halopé d'Arjowiggins Security, Philippe Guarilloff de Chanel, Lambert Henckens d'Orimono, l'équipe de Newton Technologies. La place que j'attache à l'inspiration et au questionnement ne serait pas ce qu'elle est sans mes amis, qui déploient leur talent dans les sciences humaines et les arts. Je remercie enfin Valou, mon épouse, de m'accompagner au plus près dans ce chemin qui avance chaque jour, et de m'éclairer par sa vision du monde dont le mystère aiguisera longtemps encore ma curiosité sur ce que voit l'être humain.



Mathieu Hébert, *Motifs #15*.
Encre à bille sur papier. 10 × 10 cm. 2010.

Sommaire

Chapitre 1. Introduction : Rendu visuel des surfaces colorées..... 13

1.1. Apparence et qualité des produits d'usage courant	14
1.2. Le rayonnement optique dans l'apparence des objets	15
1.3. (R)évolution de l'industrie de l'impression.....	17
1.4. Etat des lieux de la recherche sur l'image imprimée.....	20
1.5. Démarche scientifique	21
1.6. Références	22

Chapitre 2. Prédire la couleur de surfaces imprimées en demi-ton 25

2.1. Surfaces imprimées en demi-ton	26
2.2. Engraissement(s)	27
2.3. Effet Yule-Nielsen et modèles de surface	28
2.4. Modèles physiques « à deux flux »	32
2.5. Conclusion.....	34
2.6. Références	34

Chapitre 3. Modèles de transferts de flux..... 37

3.1. Matrices de transfert	37
3.2. Empilement d'éléments non-diffusants identiques	39
3.3. Équations de Kubelka-Munk généralisées	42
3.4. Matrices de transfert pour les demi-tons	45
3.5. Paramètres calculés en réflexion ou en transmission	47
3.6. Effets de bronzage	47
3.7. Extension du modèle aux couches minces	50
3.8. Conclusion.....	51
3.9. Références	51

Chapitre 4. Gestion des couleurs et nouvelles configurations d'impression55

4.1. Images « multi-vues » obtenues par impression.....	56
4.2. Gestion des couleurs d'imprimés multi-vues	60
4.3. Cryptographie visuelle en couleur	61
4.4. Impression par blanchiment de pigments	63
4.5. Impression de lustres métalliques par laser	65
4.6. Conclusion.....	68
4.7. Références	68

Chapitre 5. Perspectives : au-delà de la couleur	71
5.1. Impression : de la surface au volume	71
5.2. Métrologie optique du rendu visuel: recherche et formation	73
5.3. Un lien entre les supports imprimés et les tissus biologiques ?	76
5.4. Objets et images d'objets	77
5.5. Conclusion.....	78
5.6. Références	79
Chapitre 6. Conclusion	81
Annexe A – Numérique et numérique...	85
A.1. L'image numérique – acquisition et restitution.....	85
A.2. L'impression numérique.....	86
A.3. Modèles physiques, modèles numériques	87
Annexe B – Production scientifique	89
B.1. Articles parus dans des revues à comité de lecture	89
B.2. Contributions à des ouvrages collectifs.....	90
B.3. Actes de congrès internationaux.....	91
B.4. Rapports de recherche	92
B.5. Brevet	92
B.6. Ressources en ligne	92
Annexe C – Curriculum Vitae	93
C.1. Formation académique	93
C.2. Carrière	93
C.3. Activités de recherche	94
C.4. Encadrement de jeunes chercheurs	96
C.5. Activités d'enseignement	97
C.6. Diffusion des connaissances.....	97

Chapitre 1.

Introduction : Rendu visuel des surfaces colorées

Les travaux que je présente dans ce mémoire ont été menés entre 2006 et 2015, d'abord au Laboratoire de Systèmes Périphériques dirigé par Roger Hersch à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne en Suisse (post-doctorat de 2006 à 2009), puis au Laboratoire Hubert Curien à Saint-Etienne dans la thématique ERIS commune à l'Institut d'Optique Graduate School dirigée par Pierre Chavel (post-doctorat de 2009 à 2010, puis poste de maître de conférences depuis 2010). Ces travaux ont principalement porté sur la reproduction des couleurs assistée par modèles, concept désigné depuis peu dans la communauté internationale sous le nom *computational printing* (voir Annexe A.3). L'objectif est de produire des connaissances théoriques et pratiques permettant de prédire les propriétés spectrales de surfaces traitées par divers procédés d'impression et de créer des effets visuels nouveaux pour les arts graphiques à des fins esthétiques ou de sécurisation de documents. Les connaissances produites concernent la propagation de la lumière incohérente dans des couches colorantes et des supports, et les problématiques inverses permettant de concevoir des imprimés à effets visuels originaux. La démarche scientifique que je développe ici s'appuie sur mes propres recherches et sur celles de quatre doctorants que je supervise ou ai supervisés : Jacques Machizaud qui a soutenu sa thèse en cryptographie visuelle en 2012 ; David Nebouy qui a soutenu sa thèse en décembre 2015 sur la qualité d'images imprimées ; Serge Mazauric qui a commencé sa thèse en 2013 sur l'impression assistée par modèles optiques pour la sécurisation de documents ; Juan Martinez qui a commencé sa thèse la même année sur le rendu visuel de surfaces nanostructurées par marquage laser. Grâce à la forte interaction que j'ai établie entre la formation d'ingénieurs opticiens à l'Institut d'Optique Graduate School et la recherche, mon champ d'étude s'élargit maintenant à d'autres surfaces que les supports imprimés tels la peau et les textiles.

Ces recherches s'inscrivent depuis janvier 2015 dans une nouvelle équipe « Modèle macroscopiques d'image de surfaces » (MMIS) que j'anime au sein du département Image-Informatique-Télécom du Laboratoire Hubert Curien. En se positionnant à l'interface entre l'optique et les sciences de l'image, elles permettent d'établir des projets-passerelles entre les deux départements du laboratoire¹, le département Image, Informatique et Télécom auquel est rattachée l'équipe MMIS, et le département Optique, Photonique et Hyperfréquences. Des liens avec les entreprises du bassin stéphanois, en particulier des startups, sont entretenus par

¹ On peut citer comme exemple le projet « Photoflex » financé par l'Agence Nationale de la Recherche (2013-2017), dont nous parlerons dans le § 4.5, qui implique ces deux départements ainsi que plusieurs autres laboratoires français (voir p. 93).

l'intermédiaires de projets d'étudiants, dont nous montrerons l'importance dans la stratégie de recherche que nous développons. Sur les plans nationaux et internationaux, des travaux sont menés avec des entreprises internationales comme Gemalto (projet européen Euripidès « COSEC_ID », voir p. 95, et thèse CIFRE en cours), Arjowiggins Security (contrat en cours permettant de financer une thèse), Chanel SA, et des laboratoires académiques comme l'Institut P' et l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

D'un point de vue thématique, les recherches effectuées se situent dans la branche de l'optique liée à l'étude du rayonnement visible, c'est-à-dire la photométrie et la colorimétrie, et s'intéressent au versant de l'image concerné par la lumière – l'autre versant étant celui du traitement mathématique ou informatique de son contenu. Les travaux publiés ont parus dans des journaux d'optiques (*Journal of the Optical Society of America A* et *Applied Optics*, principalement) ou ont été présentés dans des congrès internationaux en sciences de l'image (*Electronic Imaging, Color Imaging Conference*).

Tournées vers la recherche partenariale, ces recherches s'inscrivent dans un contexte industriel assez singulier dans le paysage technologique actuel dans la mesure où la plupart des grands acteurs concernés par la couleur de matériaux héritent d'une tradition peu coutumière des sciences de la lumière et de la perception : l'œil exercé des personnes du métier a longtemps suffi à garantir la qualité des produits. Il me paraît donc important, avant d'aborder les enjeux scientifiques auxquels j'ai tenté de répondre dans le domaine spécifique de l'impression, de dresser un portrait tel que je le perçois – à travers mes collaborations sur des projets de recherche ou mes visites d'étudiants sur leur lieu de stage – de l'industrie concernée par la production de couleurs ou d'apparences afin de mieux cerner ce que la recherche en optique peut lui apporter.

1.1. Apparence et qualité des produits d'usage courant

L'histoire de l'art nous montre que le souci de l'esthétique remonte aux origines de l'humanité et semble ne jamais s'être atténué. La notion d'esthétique recouvre de multiples aspects sensoriels et culturels aux interactions complexes, mais on peut dire sans se tromper que l'apparence visuelle y tient une place importante. L'esthétique ne s'est pas seulement attachée aux objets d'arts, mais aussi aux objets d'usage courant : les collections d'arts décoratifs créées en pleine révolution industrielle comme le Museum of Manufactures à Londres en 1851 ou l'Union Centrale des Arts Décoratifs à Paris en 1882 avaient justement pour but d'inspirer les designers pour rendre plus beaux, donc plus attractifs, les biens de consommation produits en masse par la nouvelle industrie [1]. La gestion de l'apparence était un art. Elle se faisait alors, comme sans doute depuis toujours, grâce à une maîtrise empirique de la matière et une évaluation du rendu à l'œil nu.

Or, à l'heure de la révolution numérique, de nombreux procédés de coloration sont partiellement ou totalement automatisés, ce qui prive l'artisan de ses moyens habituels d'action pour optimiser l'aspect de ses produits, dans un contexte où la qualité visuelle est devenue cruciale pour pouvoir maintenir son activité dans un marché mondialisé ultra-concurrentiel. Nathalie Baudet écrit dans sa thèse sur le contrôle de qualité visuelle [2] : « La

perception d'un aspect irréprochable est le gage d'une qualité technique irréprochable. » Les méthodes de conception, de production et de contrôle des produits sont contraintes à se mettre continuellement à jour pour répondre à l'exigence croissante des consommateurs et aux normes sanitaires et environnementales de plus en plus strictes. Cette évolution génère un fort besoin en méthodes automatiques de gestion et de contrôle du rendu visuel : plusieurs thèses récentes à l'Université de Grenoble ont porté sur le contrôle d'aspect et leur possible automatisation [2-3]. Pour ce qui me concerne, la thèse de David Nébouy que je co-encadre, en contrat CIFRE avec l'imprimeur de documents sécurisés Gemalto, porte sur l'évaluation de qualité des imprimés. Un contrat en cours avec Chanel porte sur les méthodes de mesure de l'apparence de la peau. On pourrait aussi citer l'alimentation, l'automobile, le textile, le cuir, la céramique...

Ces problématiques de qualité et de mesure d'aspect dépassent de plus en plus les compétences des artisans et des ingénieurs : des outils de mesure deviennent indispensables, et l'interprétation des données mesurées nécessite parfois un travail de modélisation en laboratoire avant d'aboutir à des solutions exploitables dans le domaine industriel. Le nombre d'instruments mis sur le marché à destination de l'industrie – spectromètres, brillancemètres, gonio-spectrophotomètres ou autres – a considérablement augmenté ces quinze dernières années. Ces instruments sont vendus à un prix abordable et offrent généralement une bonne précision de mesure. De jeunes sociétés nouvellement créées se sont spécialisées dans la conception de systèmes métrologiques sur mesure pour l'automobile, la cosmétique ou la santé. Cependant, les grandeurs physiques mesurées – facteurs de réflexion spectraux ou angulaires [4-5], images à canaux rouge, vert, bleu (RGB) [6] ou à bandes spectrales plus étroites (multi-spectrales) [7-9] – sont souvent difficiles à interpréter en termes d'attributs visuels, à moins d'avoir de bonnes connaissances en optique, en cognitique et en métrologie sensorielle [10-11]. La CIE, Commission Internationale de l'Eclairage, définit l'apparence de la manière suivante [12] : « *L'apparence est la sensation visuelle par laquelle un objet est perçu pour avoir des attributs tels que la taille, la forme, la couleur, la texture, le brillant, la transparence, l'opacité, etc.* ». Dire qu'on mesure l'apparence, ou le « rendu visuel », est un abus de langage car il faudrait pour cela pouvoir modéliser les sensations issues de la perception d'un signal lumineux et les quantifier avec précision par des attributs bien définis [13], ce qui est loin d'être le cas aujourd'hui. Mais le fantasme d'un évaluateur objectif d'apparence dans l'industrie est tenace et le besoin exprimé est tel qu'il est difficile de ne pas s'attacher à y répondre [14]. Les fabricants d'instruments développent donc des interfaces logicielles tentant d'évaluer, à partir des données mesurées par leurs instruments, des attributs visuels spécifiques à telle ou telle application, interprétables par un utilisateur non-expert.

1.2. Le rayonnement optique dans l'apparence des objets

Pour traiter complètement les problèmes d'apparence d'objets, l'optique n'est qu'un maillon d'une chaîne pluridisciplinaire associant aussi la chimie et les matériaux, l'informatique, la cognitique, les neurosciences pour la part objectivable du rendu visuel, ainsi que le design et les sciences humaines pour la part socioculturelle et subjective. A défaut de disposer aujourd'hui de modèles perceptuels permettant d'imiter l'interprétation par le cerveau humain

d'un signal lumineux complexe dans l'étendue du champ visuel en fonction du contexte d'observation, la meilleure approche consiste à chercher une corrélation entre des grandeurs physiques mesurées avec des instruments sur plusieurs échantillons (mesures souvent qualifiées d' « objectives ») et les résultats d'expériences psycho-visuelles menées sur les mêmes échantillons avec un panel d'observateurs entraînés. Cette approche est déjà répandue dans certains secteurs industriels comme celui de la cosmétique. Elle est aussi utilisée en laboratoire pour estimer la qualité d'image, associée à des algorithmes d'apprentissage automatique [15-16].

La démarche de corrélation entre mesures physiques et avis d'observateurs peut paradoxalement se passer de la physique : on peut considérer l'instrument de mesure du signal lumineux comme une boîte noire et traiter les valeurs qu'il délivre (spectres, images, etc.) par des modèles purement mathématiques (voir aussi l'annexe A.3). L'analyse du rendu visuel par traitement d'image se fait souvent selon cette logique-là, de même que de nombreuses solutions de caractérisation de produits destinées à l'industrie. Cependant, on constate souvent un usage inapproprié des lois de la colorimétrie [17], lesquelles ont été établies pour la perception de signaux lumineux perçus dans un environnement noir, et non pour celle d'objets aux propriétés optiques complexes observés dans un environnement lumineux quelconque [18]. La représentation de couleurs d'objets dans un espace à deux dimensions (diagramme de chromaticité) ou trois dimensions (espace CIE XYZ ou CIE LAB) est très répandue, car elle est simple à calculer à partir de mesures spectrales ou d'images RGB, et surtout simple à visualiser. Or, on sait l'importance du rayonnement optique dans la notion de couleur. L'ouvrage de référence en colorimétrie de Wyszecki et Stiles commence justement par un important chapitre sur les lois de l'optique [19]. Les coordonnées colorimétriques d'une surface dépendent de la densité spectrale de l'éclairage, et elles peuvent aussi dépendre de sa distribution angulaire, voire de sa cohérence et sa polarisation [20]. La prise en compte d'informations physiques sur la matière et sur la lumière, en plus de permettre d'éviter des erreurs d'analyse, présente souvent de gros avantages. D'une part, elle aide au choix de l'instrument et des conditions d'éclairage les plus judicieux pour analyser les échantillons considérés en fonction de leurs propriétés optiques. D'autre part, le volume de données à traiter peut être considérablement réduit. Prenons par exemple le cas de surfaces noires aléatoirement rugueuses, dont l'attribut visuel principal est le brillant. Plutôt que de corrélérer le brillant à la fonction de densité angulaire de réflexion (ou *BRDF*, acronyme du terme anglais *Bidirectional Reflectance Distribution Function*), fonction fastidieuse à mesurer qui représente un volume important de données, on peut le corrélérer à quelques paramètres seulement : la pente moyenne du profil de rugosité, l'indice optique du matériau noir et l'angle d'incidence [21]. Cette approche a été suivie avec succès dans le cas de la rugosité perçue de la peau, alors que d'autres méthodes ne présentaient aucune corrélation avec les évaluations visuelles d'observateurs [22]. Dans l'approche inverse, prédire une fonction complexe comme la BRDF à partir de quelques paramètres physiques est un atout pour concevoir et pré-visualiser des objets.

Mais les professionnels concernés par l'apparence ont rarement de bonnes connaissances de l'optique, même dans les laboratoires de Recherche & Développement où l'ingénieur opticien est étonnamment peu présent. Cela s'explique tout de même facilement si on se souvient que,

pendant des siècles, l'élaboration des procédés de coloration s'est passée des théories de la lumière et de la perception, très récentes au regard de l'histoire de la production humaine. Le besoin d'expertise en optique ne s'exprime donc pas de manière évidente. Les ingénieurs chimistes sont beaucoup plus nombreux : une part importante des efforts de développement des procédés porte sur le travail de la matière. L'évaluation visuelle, elle, peut encore se faire à l'œil nu, ou bien à l'aide des instruments commerciaux et leurs interfaces logiciels qui visent justement à éviter d'avoir à recourir à des notions d'optiques trop avancées.

Le manque de connaissance en optique peut conduire à un usage inapproprié des instruments de mesure. Ainsi croit-on parfois que le colorimètre donne la couleur comme une montre donne l'heure, sans questionner plus avant la grandeur mesurée. Ailleurs, un instrument conçu pour mesurer la couleur de chevelures est utilisé pour mesurer l'apparence de la peau, mais les différentes sortes de brillant affichées par le logiciel, significatives pour les cheveux, n'ont pas de sens pour la peau et le système ne permet pas d'accéder aux grandeurs brutes mesurées pour tenter d'en déduire des grandeurs interprétables. La notion de spectre n'est pas acquise partout, ni les phénomènes d'absorption, de diffusion de surface ou de diffusion de volume. On décèle un important besoin de formation aux concepts optiques de base relatifs aux surfaces, même très simples. Mais l'offre de formation reste à développer. On peut d'ailleurs considérer que la communauté de l'optique n'a pas assez diffusé ses connaissances pour imprégner cette industrie. Sûrement a-t-elle mis du temps à se sentir elle-même concernée par le sujet, et le processus n'est pas achevé. Les ingénieurs opticiens sont relativement peu nombreux et s'investissent dans bien d'autres domaines où les besoins en optique sont plus clairement exprimés. Or, la surface colorée, la peinture d'art, l'image imprimée, de même que la teinture et le maquillage, peuvent être vus comme des composants optiques à part entière puisque leur fonctionnalité première est de réfléchir ou de transmettre la lumière avec des densités spectrales et angulaires particulières. C'est en tout cas une vision que nous défendons et que l'Institut d'Optique Graduate School à Saint-Etienne et le nouveau parcours SISE du master Optique-Image-Vision-Media de l'Université Jean Monnet dédié à l'ingénierie des surfaces s'emploient à relayer.

Les objets que nous allons rencontrer dans ce mémoire sont majoritairement des supports imprimés, transparents ou opaques. Leur attribut principal est la couleur, exceptionnellement associée au brillant, mais pas à la texture ni à la transparence, même dans le cas de supports transparents. C'est donc le type de surfaces le plus simple à caractériser. On retrouve à propos des surfaces imprimées la même démarche de recherche de correspondance entre l'attribut visuel et les valeurs délivrées par un instrument – colorimètre, scanner RGB, ou spectromètre calculant des valeurs colorimétriques dans l'espace CIELAB – sans considération des propriétés optiques des surfaces encrées. Ma démarche consiste au contraire à considérer ces propriétés optiques et à en exploiter les avantages.

1.3. (R)évolution de l'industrie de l'impression

Comme de nombreux autres secteurs industriels où la dimension esthétique des produits est importante, l'imprimerie s'est d'abord développée selon un modèle artisanal où le maître imprimeur savait régler les commandes de sa presse pour optimiser le rendu des couleurs et

contrôler les finitions. Cette approche artisanale pouvait encore se retrouver dans les premiers ateliers d'imprimerie que j'ai visités lorsque je commençais ma thèse au début des années 2000. Ils étaient équipés de densitomètres pour ajuster les épaisseurs de couches d'encre et respecter ainsi les normes internationales visant à standardiser le rendu des couleurs d'un point à l'autre du globe, mais l'essentiel de la gestion du rendu se faisait manuellement, notamment lorsqu'il s'agissait d'utiliser des encres ou des supports non conventionnels. Ces pratiques sont aujourd'hui en voie d'extinction avec l'expansion fulgurante des procédés d'impression entièrement automatisés, lesquels privent l'imprimeur de ses moyens habituels de contrôle du rendu visuel des produits. Dans les entreprises les mieux équipées que j'ai eu la chance de visiter, les presses analogiques ont été remplacées par des systèmes où le concept de "*computer to...*" pointe vers tous les niveaux du processus d'impression : *computer to plate* pour la gravure des plaques offset, *computer to film*, *computer to press*, etc. [23]. L'ajustement manuel des couleurs n'est plus possible. L'étalonnage colorimétrique des presses, comme pour les imprimantes, se fait selon des profils numériques (par exemple les profils ICC proposés par l'International Color Consortium [24]) à partir d'échantillons mesurés au spectro-photomètre. Un système d'épreuve par jet d'encre permet de visualiser le rendu des couleurs sur des prototypes à tirage unique avec une bonne fidélité. Les ordinateurs des graphistes sont accordés aux profils de gestion des couleurs pour avoir à l'écran une prévisualisation « réaliste » – pour autant qu'un écran le permette – de l'image imprimée. Toute la chaîne du *digital workflow* est intégrée.

L'*impression numérique* désigne les technologies déposant les encres sans recours à un support intermédiaire associé à chaque image à imprimer [25] (voir aussi l'annexe A) : les plus connues sont les technologies jet d'encre et électrophotographiques (ou "imprimantes laser") qui permettent à chacun d'entre nous de disposer d'un système d'impression chez soi, et les imprimantes 3D. Déjà très répandue pour l'usage domestique, l'impression numérique s'implante désormais dans la production industrielle en offrant de nouvelles possibilités comme l'édition à tirages limités, l'impression à la demande directement accessible au consommateur par internet, ou l'impression à données variables pour personnaliser des produits : cartes à puce, documents d'identité, etc. [26-27]. L'impression numérique donne au marché de l'impression un dynamisme nouveau [28] : son chiffre d'affaires global, déjà colossal¹, reste en progression, même si le volume de produits imprimés est en baisse du fait du développement des supports numériques de lecture tels les écrans, les liseuses et les tablettes. Le taux de croissance de l'impression numérique est actuellement de 8% par an, ce qui en fait un des secteurs les plus dynamiques de l'économie numérique (voir Figure 1). Elle représentait environ 15 % de part de marché global de l'impression dans le monde en 2013, 19 % sont prévus en 2018. A titre de comparaison, l'activité de l'impression offset traditionnelle (presses analogiques à grand tirage) se contracte de 49 % à 44 % de part de marché sur la même période.

¹ Le chiffre d'affaire mondial du secteur industriel de l'impression était évalué à 898 millions de dollars américains en 2013, et estimé à 980 millions en 2018 selon les prévisions par la société de consultance américaine Smithers Pira [29].

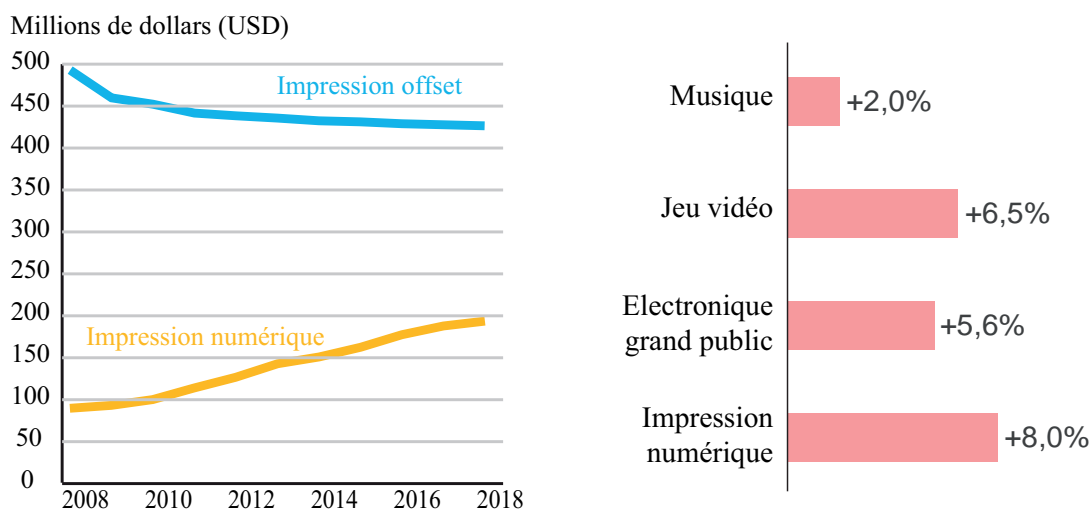


Fig. 1. A gauche : Evolution du marché mondial de l'impression offset traditionnelle et de l'impression numérique (Source : *The Binding Edge* [27], d'après *Smithers Pira*). A droite : croissance annuelle mondiale sur la période 2013 – 2017 de l'impression numérique comparée à celle d'autres secteurs (Sources: *PWC*, *IBISWorld*, *Smithers Pira*, remerciements à *C. Leynadier*).

L'impression numérique peut se passer intégralement de l'imprimeur. La gestion des couleurs doit donc se faire en amont de l'impression, pour chaque jeu de consommables utilisé. La méthode de gestion la plus répandue est le profil ICC qui vise à établir une correspondance de couleurs entre divers dispositifs : appareil photo numérique, écran, imprimante, scanner, video-projecteur, etc. Comme toute méthode basée sur les espaces colorimétriques à trois dimensions, l'influence de l'éclairage sur le rendu des couleurs n'est pris en compte que de manière imparfaite, de même que la différence de perception des couleurs affichées sur un support émetteur de lumière et celles imprimées sur un support réflecteur. Les profils ICC donnent donc rarement satisfaction aux imprimeurs les plus exigeants, en particulier les photographes amateurs qui effectuent leur tirages sur leur imprimante personnelle. Ils sont par contre bien implantés dans l'industrie de l'impression : malgré les milliers d'échantillons que le calibrage du profil demande pour chaque combinaison de consommables (encres, supports, finitions) et de tramage des couches d'encres, les entreprises que j'ai rencontrées ne se sont pas montrées prêtes à abandonner ces profils au profit de méthodes basées sur des modèles optiques, qui peuvent pourtant se contenter de quelques dizaines d'échantillons seulement à mesurer. Mais on peut prédire que les modèles optiques seront moins boudés à l'avenir s'ils sont intégrés dans des solutions de calibrage automatique des systèmes d'impression, et ce d'autant plus que les profils ICC montrent leurs limites quand l'imprimé présente des effets de relief [30-31], de brillant, de transparence [32] ou de texture [33-34] que les nouveaux procédés d'impression peuvent facilement produire, ou tenter de reproduire. La gestion des couleurs glisse donc vers une problématique de gestion de l'apparence globale combinant tous attributs visuels à la fois [35]. Ceci soulevant ainsi des enjeux scientifiques captivants sur lesquels nous reviendrons.

1.4. Etat des lieux de la recherche sur l'image imprimée

La communauté de l'optique s'intéresse assez peu aux surfaces imprimées, et il en va de même de la recherche académique en général : le nombre de chercheurs impliqués dans le monde sur ce sujet est insignifiant au regard du poids économique de l'industrie de l'impression. La recherche s'est historiquement faite dans les centres de recherche des grandes entreprises. Dans les années 1950, sorte d'âge d'or pour l'optique appliquée à l'image imprimée, l'état de l'art était dominé par les laboratoires de l'Eastman Kodak Company à Rochester (USA) où des chercheurs comme Williams, Clapper et Yule ont posé les bases des modèles optiques que nous revisitons encore, en particulier les modèles Williams-Clapper, Clapper-Yule [36-37], publiés en 1953 dans *Journal of the Optical Society of America* aux côtés des célèbres articles de Kubelka sur l'approche à deux flux. Par la suite, l'implication des opticiens s'est estompée jusqu'à la fin des années 1990 où la parution d'études dans les revues de l'Optical Society of America s'est à nouveau intensifiée. Aujourd'hui, à l'ère du numérique, la reproduction des couleurs et celle de l'apparence ont logiquement rejoint les sciences de l'image. Des études sont ainsi présentées chaque année dans le symposium *Electronic Imaging*, créé en 1988, et la conférence internationale *Color Imaging Conference* (CIC), créée en 1993, tous deux soutenus par la société savante Society for Imaging Science and Technology (IS&T). D'autres travaux paraissent régulièrement dans les revues *Journal of the Imaging Science and Technology*, *IEEE transaction for Image processing* et *Color Research and Application*. La conception d'effets graphiques innovants par impression assistée par modèle est aussi valorisée par la création en 2015 d'une nouvelle session "Computational Printing" dans la très sélective conférence SIGGRAPH dédiée à la synthèse d'images. Les laboratoires d'entreprise sont moins présents dans la littérature scientifique qu'à l'origine, à l'exception notable de Canon à travers son centre français Océ Print Logic Technologies qui soutient activement l'organisation de la conférence "Measuring, modeling, reproducing the material appearance" au sein du symposium *Electronic Imaging* depuis 2014. Il n'est pas surprenant que cet investissement provienne d'un concepteur de solutions d'impression, comme l'était Kodak dans les années 1950.

En dehors des laboratoires des entreprises, quelques équipes de recherche académique sont activement impliquées sur le sujet : le Munsell Color Science Lab. (Rochester Institute of Technology, USA), le Norwegian Colour and Visual Computing Laboratory (Université de Gjøvik, Norvège), le Fraunhofer Institute for Computer Graphics Research IGD (Darmstadt, Allemagne), le Laboratoire de Systèmes Périphériques (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse), le laboratoire Media and Information Technology (Université de Linköping, Suède) et le Horiuchi & Hirai Lab. (Chiba University, Japon). La recherche française dans ce domaine est représentée par les contributions du Laboratoire Hubert Curien depuis mon arrivée en 2009 ; assez peu de travaux les ont précédées, ce qui peut paraître surprenant compte tenu de la présence en France et en Suisse de grandes sociétés d'impression de valeur, mondialement connues pour la production des documents d'identité, des cartes et de la monnaie papier, et qui cherchent constamment des solutions optiques pour protéger ces produits de la contrefaçon. Ceci ne signifie pas pour autant que les problématiques scientifiques associées à la coloration des surfaces ne soient pas traitées en

France. L'approche optique y est même bien représentée. On peut mentionner une spécificité dans le traitement optique de la couleur de pièces plus nobles du patrimoine culturel : de belles études ont porté par exemple sur le verre et le vitrail [38-42], le lustre céramique [43], la peinture [44-45] et les pigments [46-50]. On peut aussi mentionner une activité portant sur la métrologie du brillant [21,51]. Plus généralement, la recherche sur la diffusion lumineuse par les surfaces et les milieux stratifiés est bien représentée en France, à travers l'Institut des NanoSciences de Paris, le Laboratoire CORIA à Rouen, l'Institut Fresnel à Marseille, le Laboratoire Charles Fabry et encore quelques autres [52-60].

1.5. Démarche scientifique

Les enjeux scientifiques (classiques) associés à la prédiction des couleurs imprimées seront décrits en détail dans le chapitre suivant, mais on peut déjà dire que le papier encre est un matériau multi-échelle très hétérogène, difficile à décrire d'un point de vue optique sauf en le représentant comme une superposition de couches de milieux effectifs, optiquement homogènes à l'échelle macroscopique. Le recours à des modèles de transfert radiatif est tentant. Il figurait dans mon projet de recherche lors de mon arrivée au Laboratoire Hubert Curien et sera à mon avis incontournable pour lever un verrou qui obsède la communauté de la reproduction des couleurs depuis longtemps : prédire la variation des couleurs obtenues avec un même système d'impression sur différents supports [61]. Cependant, deux raisons ont reculé l'adoption de modèles de transfert radiatif au-delà de la version simplifiée dite « à deux flux ». La première raison est que les encres sont très peu diffusantes, pour garantir une palette de couleurs la plus large possible, alors que les supports sont en général soit très diffusants (papiers, cartons, polymères chargés et autres support opaques), soit non-diffusants (films transparents, éventuellement verres ou foils métallisés). L'approche à deux flux est suffisante dans ces deux cas, comme nous allons le voir. La deuxième raison vient de la complexité des modèles de transfert radiatif, surtout avec les milieux non-homogènes à l'échelle mésoscopique comme les supports imprimés en demi-ton, alors que les modèles requis pour la gestion des couleurs imprimées doivent permettre un traitement très efficace des problématiques inverses. Ces deux arguments commencent néanmoins à devenir caducs : les imprimantes 3D sont capables de générer des surfaces translucides semi-diffusantes [33], pour lesquels l'approche à deux flux n'est théoriquement plus valable, pendant que la simplification du transfert radiatif pour nos besoins est maintenant à notre portée grâce aux nombreux travaux exploratoires conduits ces dernières décennies [52,59] et à l'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs. Ces points seront discutés plus longuement dans le Chapitre 5.

En attendant, mes investigations sur les modèles à deux flux dédiés aux supports imprimés avec des technologies classiques, que je pensais quasiment abouties au sortir de mon doctorat, m'ont occupé encore près de dix ans. À partir des modèles étendus à l'observation d'imprimés en transmission que j'avais commencé à développer durant ma thèse, il était tentant de me pencher sur les problématiques inverses et d'en explorer les possibilités graphiques. Aujourd'hui, on peut prédire simultanément les facteurs spectraux de réflexion et de transmission d'imprimés recto-verso ou empilés grâce à des modèles relativement simples à

calibrer qui ne demandent pas plus d'échantillons de calibration que celle du facteur de réflexion d'imprimés recto-simple conventionnels. Pour évaluer la précision des modèles, nous avons recours aux distances colorimétriques définies par la CIE, calculées pour un illuminant donné entre les spectres prédits et ceux mesurés sur un jeu d'échantillons de vérification. Ces distances colorimétriques sont encore relativement fiables pour des surfaces diffusantes et uniformément colorées. Mais l'ultime évaluation de précision se fait par l'œil de l'observateur : un modèle précis est pour nous un modèle qui permet de produire deux échantillons structurellement différents ayant des rendus identiques (ou un écart de rendu non distinguable) sous un éclairage donné. La valeur scientifique que je vois dans ces travaux réside autant dans le développement de modèles directs que dans les problématiques inverses qu'ils permettent d'aborder, et leur potentiel d'innovation.

Ce mémoire est structuré de manière à rappeler d'abord la problématique scientifique générale de la reproduction des couleurs, notamment par l'impression en demi-ton (Chapitre 2), puis à présenter mes principales contributions dans ce domaine à travers des modèles prédictifs originaux (Chapitre 3) et la résolution de problématiques inverses pour l'impression sécurisée et pour l'impression sans encre (Chapitre 4). Les perspectives de recherches que j'entrevois pour les prochaines années sont décrites dans le Chapitre 5, avant de proposer dans le Chapitre 6 une conclusion plus personnelle sur mon parcours et quelques réflexions pour l'avenir. Enfin, puisque le terme « numérique » va apparaître régulière dans ce mémoire avec une signification qui peut varier selon le contexte, j'ai jugé utile d'ajouter une note informelle en annexe à ce propos, avant les deux autres annexes consacrées à ma production scientifique et à mon curriculum vitae.

1.6. Références

1. F. Buffet, *Education et culture en Europe*, L'Harmattan, p. 124 (2003).
2. N. Baudet, *Maîtrise de la qualité visuelle des produits – Formalisation du processus d'expertise et proposition d'une approche robuste de contrôle visuel humain*, Thèse de doctorat, Université de Grenoble (2012).
3. Gaëtan Le Goïc. *Qualité géométrique & aspect des surfaces : approches locales et globales*, Thèse de doctorat, Université de Grenoble (2012).
4. A. Kimachi, N. Tanaka, S. Tominaga, "Development and Calibration of a Gonio-Spectral Imaging System for Measuring Surface Reflection," *IEICE Transactions on Information and Systems*, Paper E89D (2006).
5. A. S. Sole, I. Farup, S. Tominaga, "An image-based multi-directional reflectance measurement setup for flexible objects," *Proc. SPIE* **9398**, Paper 93980J (2015).
6. A. Harouna S., B. Bringier, M. Khoudeir, "Print Spectral Reflectance Estimation using Trichromatic Camera," *Proc. SPIE* 9534, Paper 953408 (2015).
7. R. S. Berns, F. H. Imai, P. D. Burns, D.-Y. Tzeng, "Multispectral-based color reproduction research at the Munsell Color Science Laboratory," *Proc. SPIE* **3409** (1998).
8. S. Tominaga, S. Kohno, S. Kakinuma, F. Nohara, T. Horiuchi, "Spectral reflectance estimation using a six-color scanner," *Proc. SPIE* **7241**, Paper 72410W (2009).
9. H. Vakili, R. Kolakovic, N. Genina, M. Marmion, H. Salo, P. Ihalainen, J. Peltonen, N. Sandler, "Hyperspectral imaging in quality control of inkjet printed personalised dosage forms," *Int J Pharm.* **483**, 244–9 (2015).
10. P. N. Martin, R. S. Hunter, *Sensory Evaluation of Appearance of Materials*, ASTM (1973).
11. R. Hunter, R. W. Harold, *The measurement of appearance*, John Wiley & Sons (1989).
12. Commission Internationale de l'Eclairage, "A framework for the measurement of visual appearance", CIE technical report 175 (2006).

13. L. Albertazzi, *Handbook of Experimental Phenomenology: Visual Perception of Shape, Space and Appearance*, Wiley-Blackwell, 2013.
14. Leah Pickett, "The Future of Color Measurement," *Quality Magazine*, October 2, 2014.
15. K. Gu, G. Zhai, X. Yang, W. Zhang, "A new psychovisual paradigm for image quality assessment: from differentiating distortion types to discriminating quality conditions," *IEEE Proc. Signal, Image and Video Processing* 7, 423–436 (2013).
16. C. Charrier, T. Eude, "A psychovisual color image quality metric integrating both intra and inter channel masking effect," *IEEE Proc. 12th European Signal Processing Conference*, 2123–2126 (2004).
17. A. S. Kumar Choudhury, "Color measurement instruments," in *Principle of colour appearance and measurement*, Woodhead Publishing, Chapitre 6, pp. 221–269 (2014).
18. M. D. Fairchild, *Color Appearance models*, 2nd Ed., Wiley (2005).
19. Wyszecki, G., Stiles, W.S.: *Color science: Concepts and methods, quantitative data and formulae*, Wiley, New York, 2nd edition (1982).
20. M. Hébert, M. Mallet, A. Deboos, P. Chavel, D.-F. Kuang, J.-P. Hugonin, M. Besbes, A. Cazier, "Exploring the bronzing effect at the surface of ink layers," *Proc. SPIE* 9398, Paper 93980U (2015).
21. G. Obein, *Caractérisation optique et visuelle du brillant*, Thèse de doctorat, Conservatoire National des Arts et Métiers, 2003.
22. R. Ohtsuki, T. Sakamaki, S. Tominaga, "Analysis of skin surface roughness by visual assessment and surface measurement," *Optical Review* 20, 94–101 (2013).
23. H. Kipphan, "Computer to... technologies," in *Handbook of Print Media*, Springer, Chapter 4, pp. 579–674 (2001).
24. International Color Consortium, "Image technology colour management — Architecture, profile format, and data structure," *Specification ICC.1:2004-10* (2004).
25. H. Kipphan, *Handbook of Print Media*, Springer (2001).
26. J. Clark, "On Demand Evolution," *The Binding Edge*, Spring 2012.
27. M. Bigianti, A. Lanter, "Digital printing leads to print finishing opportunities," *The Binding Edge*, February–March 2015.
28. R. H. Davis, "The Economy and Print Markets in 2014–2015," *The Binding Edge*, Winter 2014.
29. Smither Pira market report, *The Future of Global Printing to 2018*, Smither Pira, December 20, 2013.
30. S. Tominaga, S. Nishi, "Surface reflection properties of oil paints under various conditions", *Proc. SPIE* 6807, Paper 68070M (2008).
31. T. Baar, S. Samadzadegan, M. V. Ortiz-Segovia, P. Urban, H. Brettel, "Printing gloss effects in a 2.5D system," *Poc. SPIE* **9018**, Paper 90180M (2014).
32. C. A. Arikan, A. Brunton, T. M. Tanksale, P. Urban, "Color-managed 3D printing with highly translucent printing materials," *Poc. SPIE* **9398**, Paper 93980S (2015).
33. C. E. Parraman, "The visual appearance and surface texture of materials according to the old masters," *Poc. SPIE* **9018**, Paper 90180H (2014).
34. S. C. Pont, A. Jacoba van Doorn, M. W. A. Wijntjes, J. J. Koenderink, "Texture, illumination, and material perception," *Poc. SPIE* **9394**, Paper 9394OE (2015).
35. A. S. Kumar Choudhury, "Color and appearance attributes," in *Principle of colour appearance and measurement*, Woodhead Publishing, Chapitre 3, pp. 103–143 (2014).
36. F. C. Williams, F. R. Clapper, "Multiple Internal Reflections in Photographic Color Prints," *J. Opt. Soc. Am.* **43**, 595–597 (1953).
37. F. R. Clapper and J. A. C. Yule, "The Effect of Multiple Internal Reflections on the Densities of Halftone Prints on Paper," *J. Opt. Soc. Am.* **43**, 600–603 (1953).
38. M. Vichy, M. Picon, V. Thirion-Merle, "Le manganèse comme impureté, décolorant ou colorant des verres au natron," *Bulletin AFAV*, 15–17 (2002).
39. J.-P. Houdaer, "La coloration des verres," *Verre* **11**, 2–16 (2005).
40. V. Reillon, B. Serge, C. Andraud, "New perspectives for the understanding of the optical properties of middle-age nano-cermetes: The lustres," *Physica B Condensed Matter* **394**, 242–247 (2007).
41. P. Sciau, "Nanoparticles in ancient materials: The metallic lustre decorations of medieval ceramics," in *Delivery of Nanoparticles*, A. A. Hashim Ed., InTech, Chapter 25, pp. 527–540 (2012).

42. J. Lafait, S. Berthier, C. Andraud, V. Reillon, J. Boulenguez, "Physical colors in cultural heritage: Surface plasmons in glass," *Comptes Rendus Physique* **10**, 649–659 (2009).
43. V. Reillon, S. Berthier, C. Andraud, "Optical properties of lusted ceramics: complete modelling of the actual structure," *Appl. Phys. A* **100**, 901–910 (2010).
44. L. Simonot, M. Elias, E. Charron, "Special visual effect of art glazes explained by the radiative transfer equation," *Appl. Opt.* **43**, 2580–2587 (2004).
45. L. Simonot, *Etude expérimentale et modélisation de la diffusion de la lumière dans une couche de peinture colorée et translucide*, Université Pierre et Marie Curie – Paris VI (2006).
46. G. Dupuis, M. Elias, L. Simonot, "Pigment Identification by Fiber-Optics Diffuse Reflectance Spectroscopy," *Appl. Spectrosc.* **56**, 1329–1336 (2002).
47. G. Latour, M. Elias, J.-M. Frigerio, "Determination of the Absorption and Scattering Coefficients of Pigments: Application to the Identification of the Components of Pigment Mixtures," *Appl. Spectrosc.* **63**, 604–610 (2009).
48. R. Jarrige, C. Andraud, J. Lafait, M. Eveno, M. Menu, N. Diniz, "Determination of the complex optical index of a red pigment, Vermillon," *Proc. SPIE* **8084**, Paper 80840D (2011).
49. M. Elias, "Relationship between the size distribution of mineral pigments and color saturation," *Appl. Opt.* **50**, 2464–2473 (2011).
50. P.-A. Cuvelier, C. Andraud, D. Chaudanson, J. Lafait, S. Nitsche, "Copper red glazes: a coating with two families of particles," *Appl. Phys. A* **106**, 915–929 (2013).
51. G. Obein, K. Knoblauch, F. Viénot, "Difference scaling of gloss: Nonlinearity, binocularity, and constancy," *Journal of Vision* **4** (2004).
52. B. Maheu, J. N. Toulouzian, G. Gouesbet, "Four Flux Models to Solve the Scattering Transfer Equation in Terms of Lorentz Mie Parameters," *Appl. Opt.* **23**, 3353–3362 (1984).
53. C. Tonon, C. Rozé, T. Girasole, M. Dinguirard, "Four-flux model for a multilayer, plane absorbing and scattering medium: application to the optical degradation of white paint in a space environment," *Appl. Opt.* **40**, 3718–3725 (2001).
54. C. Rozé, T. Girasole, A. G. Tafforin, "Multilayer four-flux model of scattering, emitting and absorbing media," *Atmospheric Environment* **35**, 5125–5130 (2001).
55. J. Caron, *Diffusion de la lumière dans les milieux stratifiés: prise en compte des interfaces rugueuses et des effets de polarisation*, Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie – Paris VI (2003).
56. S. Durant, *Propagation de la lumière en milieu aléatoire, Rôle de l'absorption, de la diffusion dépendante et du couplage surface-volume*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Paris (2003).
57. B. Stout, C. Andraud, S. Stout, J. Lafait, "Absorption in multiple-scattering systems of coated spheres," *J. Opt. Soc. Am. A* **20**, 1050–1059 (2003).
58. A. da Silva, M. Elias, C. Andraud, J. Lafait, "Comparison of the auxiliary function method and the discrete-ordinate method for solving the radiative transfer equation for light scattering," *J. Opt. Soc. Am. A* **20**, 2321–2329 (2003).
59. M. Elias, G. Elias, "Radiative transfer in inhomogeneous stratified scattering media with use of the auxiliary function method," *J. Opt. Soc. Am. A* **21**, 580–589 (2004).
60. J. Sorrentini, M. Zerrad, G. Soriano, and C. Amra, "Enpolarization of light by scattering media," *Opt. Express* **19**, 21313–21320 (2011).
61. R.D. Hersch, M. Hébert, "Interaction between Light, Paper and Color Halftones: Challenges and Modelization Approaches," *Proc. IS&T/CGIV*, 1–7 (2006).

Chapitre 2.

Prédire la couleur de surfaces imprimées en demi-ton

La difficulté de l'étalonnage colorimétrique des systèmes d'impression vient des multiples formes que peut prendre l'interaction encres-support-lumière, à cause desquelles – nous en avons tous fait l'expérience – le rendu des couleurs d'une même image varie sensiblement d'une imprimante à l'autre ou d'un papier à l'autre. A ce jour, dans l'industrie, les systèmes sont étalonnés par des méthodes numériques de gestion des couleurs, comme par exemple les profils ICC [1]. Ces méthodes nécessitent d'imprimer et de mesurer plusieurs centaines de couleurs : la mire IT8.7/4 éditée par Fogra pour le calibrage des presses offset en contient exactement 1617. Et l'opération doit être répétée chaque fois qu'on change de support, d'encre ou de trame de demi-ton. Longues et coûteuses, ces procédures d'étalonnage sont souvent opérées sur un ensemble limité de combinaisons support-encres-trame, ce qui conduit les imprimeurs à n'exploiter qu'une part limitée des possibilités graphiques offertes par leurs systèmes d'impression, à moins d'accepter de réaliser plusieurs essais avant d'atteindre la couleur souhaitée avec un système non calibré. Entre autres inconvénients, les profils colorimétriques permettent difficilement de gérer les couleurs en fonction des conditions d'éclairage – densité spectrale, géométrie angulaire... Les méthodes basées sur le facteur spectral de réflexion sont plus indiquées car elles permettent de calculer ensuite les coordonnées colorimétriques pour n'importe quel illuminant. Elles demandent aussi moins de mesures et peuvent s'accorder plus aisément avec les phénomènes optiques impliqués dans le rendu des couleurs [2].

Un des objectifs à long terme visés par la communauté scientifique est de modéliser les interactions encres-support-lumière de manière à pouvoir prédire toutes les couleurs reproductibles à partir des propriétés optiques des encres et de celles du support, mesurées séparément. Cet objectif, qui ne peut être traité que par des modèles physiques, est encore loin d'être atteint. Les modèles disponibles aujourd'hui, récemment passés en revue et testés avec Roger Hersch de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne [3], peuvent prédire le facteur spectral de réflexion de supports transparents ou fortement diffusants imprimés avec trois ou quatre encres de couleurs quelconques avec des trames de demi-ton classiques (trames périodiques ou stochastiques), moyennant la mesure du facteur spectral de réflexion de 25 à 44 échantillons. On peut aussi considérer des trames personnalisées ou des microstructures, le nombre d'échantillons à mesurer étant plus élevé tout en restant acceptable¹.

Malgré ces progrès, les profils colorimétriques restent bien implantés dans l'industrie : le calibrage par modèles n'intéresse pour l'instant l'industrie que dans des applications

¹ Ce nombre est en principe de 1072 [4], mais peut être réduit à 72 sans perte de précision excessive [5].

spécifiques où les méthodes colorimétriques ne peuvent s'appliquer, comme celles dont il sera question avec l'impression par blanchiment de pigments (§ 4.4). Pour que des méthodes d'étalonnage des couleurs par modèle optique deviennent attractives, il faut qu'elles soient assez génériques pour s'appliquer à tout type d'impression à trois, quatre, six encres [6], et que leur calibrage soit le plus aisé possible, en demandant peu de mesures avec un instrument accessible. Il faut aussi que les modèles soient suffisamment simples pour être inversés lors de l'étape de *séparation des couleurs* [Ref. 1, p. 27], étape où l'on calcule les quantités d'encres à déposer pour obtenir le rendu visé. Ces objectifs d'universalité et de simplicité sont prioritaires dans les approches de modélisation que nous choisissons pour la gestion des couleurs. Mais avant de revenir sur ces questions plus directement dans le Chapitre 4, le présent chapitre vise à rappeler la spécificité optique des couleurs en demi-ton et les bases physiques des modèles couramment utilisés afin d'introduire les extensions auxquelles j'ai contribué.

2.1. Surfaces imprimées en demi-ton

La surface imprimée est d'abord un objet optique à fonctionnalité visuelle, chargé de réfléchir ou transmettre la lumière pour véhiculer une image. L'absorption sélective des longueurs d'onde, qui génère la sensation colorée chez l'observateur, se fait par dépôt de matières colorantes : les encres. La surface imprimée est donc multicouche. A part les technologies relativement récentes comme la sublimation ou le transfert thermique de colorants [1, p. 687] qui sont capables de déposer une couche colorante continue à épaisseur optique variable comme en photographie argentique ou en peinture, la plupart des systèmes d'impression appliquent les encres selon un procédé binaire et génèrent les couleurs par demi-ton (*halftone*). La surface se présente alors comme une mosaïque de couleurs de base, appelées *primaires de Neugebauer*, ou simplement *primaires*, résultant de la superposition partielle des points d'encres (Figure 2).

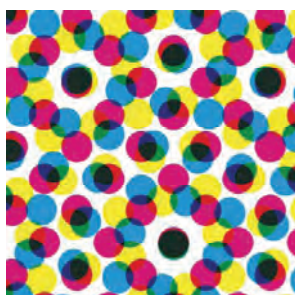


Fig. 2. Une couleur en demi-ton d'encres cyan, magenta et jaune présentant les huit primaires de Neugebauer : blanc, cyan, magenta, jaune, rouge, vert, bleu et noir.

D'un point de vue optique, les surfaces en demi-ton se distinguent notablement des peintures à cause de la non-uniformité de leurs propriétés optiques à l'échelle mésoscopique. Pour les peintures, on peut traiter en première approximation le mélange des couleurs de base (pigments, colorants...) par la loi d'additivité de Duncan [7], qu'on appelle communément loi

de « synthèse soustractive des couleurs », bien qu'il s'agisse d'une addition d'épaisseurs optiques spectrales plutôt que d'une soustraction de couleurs au sens colorimétrique. Pour les demi-tons, la relation entre leur couleur perçue de loin et celle des primaires prises individuellement est plus complexe : à l'arrière des points d'encres, le support diffuse et mélange les composantes lumineuses « colorées » par les primaires. Ceci me conduit donc à préférer la notion de « mélange spectral » à celle de « mélange des couleurs » dans le cas des surfaces imprimées [8]. Dans l'état de l'art concernant la prédiction du facteur spectral de réflexion de ces surfaces, on distingue deux grandes approches : les modèles dits « de surface » où les facteurs de réflexion des primaires sont combinés selon une équation empirique, et les modèles « physiques » qui décrivent la propagation de flux lumineux dans le support et les encres [9].

2.2. Engraissement(s)

Selon les propriétés physico-chimiques et mécaniques des matériaux, les encres peuvent s'étaler plus ou moins sur le support, générant ce que les imprimeurs appellent l'« engraissement du point » (*“mechanical dot gain”*). Les taux de couverture des primaires sont donc a priori inconnus et doivent être déterminés à partir d'observations de demi-tons imprimés. A cet étalement s'ajoute l'effet plus ou moins intense de la diffusion par les encres ou le support, qui crée une sorte de halo coloré autour des points d'encre dont l'image devient alors floue, comme illustré par la Figure 3. Ce phénomène, appelé « engraissement optique du point » (*“optical dot gain”*) ou « effet Yule-Nielsen » [10], renforce l'absorption de la lumière par les encres : le demi-ton est plus sombre qu'il ne le serait si la lumière était réfléchiée par chaque primaire indépendamment des autres. L'effet est plus prononcé à mesure que les points d'encre deviennent plus petits et rapprochés dans des demi-tons à haute linéature, et à mesure que le support devient plus diffusant.

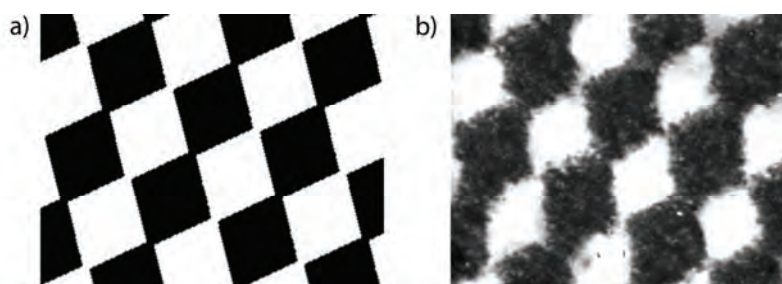


Fig. 3. (a) Trame d'encre noire telle que définie dans l'image numérique originale, et (b) trame réelle observée par microscope dans une version imprimée sur papier. L'engraissement des points d'encre rend les contours des points flous.

La combinaison de ces deux effets d'engraissement fait que le taux de couverture réel des primaires n'est pas un paramètre directement mesurable, même par imagerie microscopique, à moins de coupler l'analyse des images microscopiques à un modèle d'engraissement optique [11-13]. Des travaux sur des demi-tons d'une encre à l'Université de Linköping en Suède tentent par ces moyens de découpler les engraissements mécanique et optique pour étudier par

exemple la forme « réelle » des points d'encre sur divers substrats [14-16]. Ces méthodes par microscopie sont cependant lourdes à mettre en œuvre. Crété *et al.* [17] ont proposé une méthode macroscopique beaucoup moins contraignante, néanmoins robuste, pour estimer les taux de couverture des primaires en mesurant les facteurs de réflexion de 36 demi-tons représentés dans la Figure 4 dans lesquels une seule des trois encres est tramée. Pour chaque demi-ton, un taux de couverture effectif est ajusté de manière à minimiser l'écart entre le facteur de réflexion mesuré et celui prédit par un modèle optique, ce qui permet d'établir par interpolation des courbes de correspondance entre les taux de couverture nominaux et effectifs en tenant compte de l'influence des superposition d'encres. Cette méthode, que j'ai adoptée dans mes propres développements de modèles pour sa précision et sa simplicité de mise en œuvre, dépend toutefois du modèle utilisé, comme j'ai pu le montrer à travers l'étude de points d'encre « flous » [18].

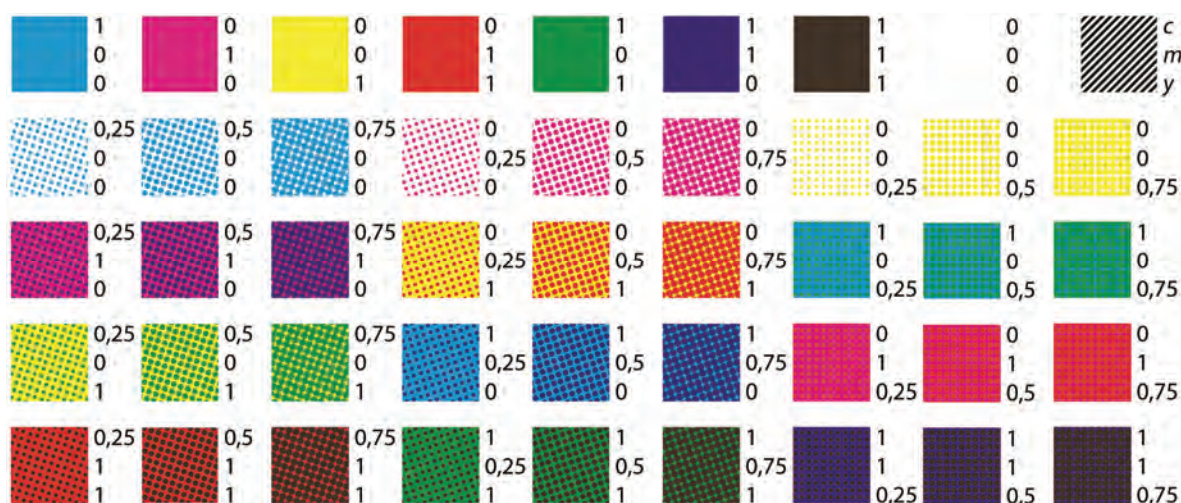


Fig. 4. Mire de calibration des modèles prédictifs selon Crété *et al* [17], pour l'impression à trois encres. *Rangée du haut* : les huit primaires de Neugebauer. *Rangées suivantes* : les 36 demi-tons permettant d'évaluer l'engraisement des points d'encre. Les valeurs c , m et y indiquent le taux de couverture nominal des encres cyan, magenta et jaune, respectivement.

2.3. Effet Yule-Nielsen et modèles de surface

A cause de l'engraisement optique du point d'encre, le facteur de réflexion du demi-ton n'est pas directement proportionnel à celui des primaires [2], contrairement à ce que suggéraient les modèles primitifs de Neugebauer (1931) [19] et de Murray-Davies (1936) [20]. A titre d'illustration, prenons un demi-ton d'une encre cyan imprimée sur papier par jet d'encre, de taux de couverture nominal 0,5. A cause de l'engraisement mécanique, qui dépend de la nature de l'encre et du support, et de la trame utilisée, le taux effectif de couverture de l'encre est a . Le facteur spectral de réflexion de la surface, $R_{0,5}(\lambda)$, est tracé dans la Figure 5-a, ainsi que ceux des primaires blanche (papier sans encre) et cyan (papier couvert à 100% par l'encre), notées respectivement $R_0(\lambda)$ et $R_1(\lambda)$. La Figure 5-a montre que le facteur spectral de réflexion du demi-ton prédit par l'équation spectrale de Neugebauer :

$$R_{0.5}(\lambda) = (1-a)R_0(\lambda) + aR_1(\lambda), \quad (1)$$

tracé en rouge, est en très mauvais accord avec celui mesuré, bien que le taux de couverture $a' = 0.76$ ait été ajusté pour minimiser l'écart entre le spectre mesuré et le spectre prédit. Une représentation graphique que j'ai proposée [21] permet de visualiser la relation entre les facteurs de réflexion des primaires et ceux du demi-ton pour chaque longueur d'onde à travers les ratios $y = R_{0.5} / R_0$ et $x = R_1 / R_0$ (Figure 5-b).

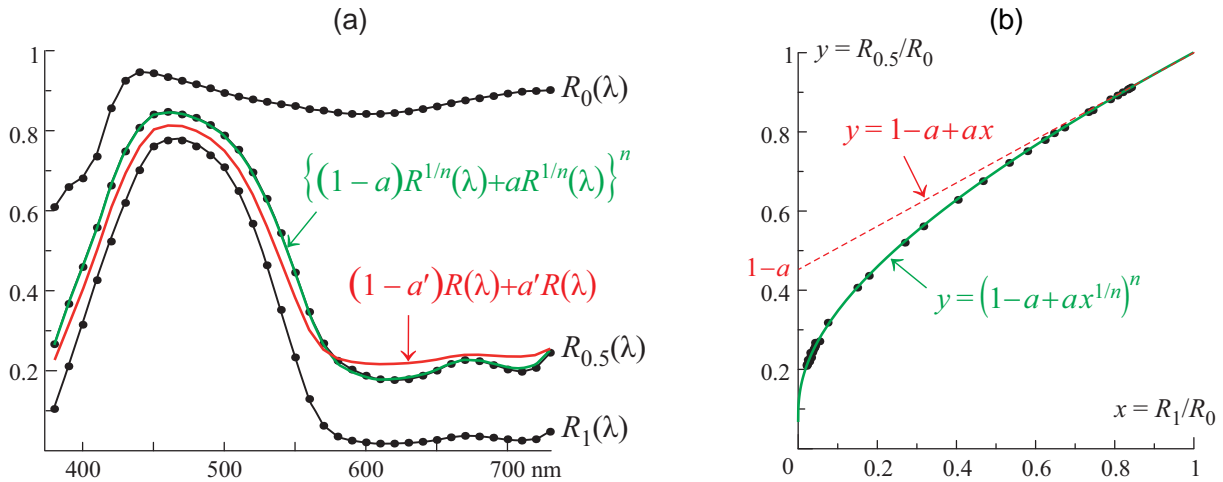


Fig. 5. a) En noir, facteurs spectraux de réflexion mesurés sur un support sans encre (R_0), et avec de l'encre couvrant 50% et 100% de la surface ($R_{0.5}$ et R_1).

En rouge, facteur de réflexion prédit par l'équation de Neugebauer avec la valeur optimisée du taux de couverture $a' = 0.76$; l'écart colorimétrique équivalent entre les spectres mesurés et prédits est de 4.6 unités de CIELAB ΔE_{94} .

En vert, facteur de réflexion prédit par l'équation de Neugebauer corrigée par Yule-Nielsen avec $n = 3.5$ et la valeur optimisée du taux de couverture $a = 0.54$; l'écart colorimétrique équivalent entre les spectres mesurés et prédits est de 0.2 unité de CIELAB ΔE_{94} .

b) Diagramme des points (x, y) issus des mesures pour chaque longueur d'onde.

Dans notre exemple, au lieu que les points s'alignent sur une droite d'équation $y = 1 - a + ax$ comme le suggère l'équation (1), ils suivent une courbe de type racine n ième que l'on approxime très bien par l'équation :

$$y(\lambda) = (1 - a + ax^{1/n})^n. \quad (2)$$

Ceci confirme la correction empirique suggérée par Yule et Nielsen (1951) [10], reprise sous forme spectrale par Viggiano (1985) [22], conduisant à l'équation spectrale de Neugebauer corrigée selon Yule-Nielsen ("*Yule-Nielsen-modified Spectral Neugebauer model*") :

$$R_{0.5}(\lambda) = \left[(1-a)R_0^{1/n}(\lambda) + aR_1^{1/n}(\lambda) \right]^n, \quad (3)$$

où n est un paramètre libre dont la valeur donnant le meilleur accord entre prédiction et mesure est généralement supérieure à 1 dans le cas d'encres translucides. Elle est de 3,5 dans notre exemple et permet de prédire un facteur de réflexion pour le demi-ton, tracé en vert dans

la Figure 5-*a*, beaucoup plus proche de celui mesuré avec une valeur optimisée du taux de couverture de l'encre plus raisonnable ($a=0.54$). La valeur augmente avec le pouvoir diffusant du support, pouvant tendre asymptotiquement vers l'infini, ou prendre une valeur négative quand l'encre entre dans le support [23-25]. L'expérience montre que n est proche de 1 dans le cas de supports très spéculaires¹, proche de 2 dans le cas de films pour l'impression jet d'encre à cause de la faible diffusion lumineuse par les encres [26], et peut monter à 10 pour les imprimés sur papier [3]. Il est commun d'observer que la valeur de n augmente quand on augmente la fréquence de trame du demi-ton, les points d'encre devenant plus petits et plus rapprochés. On peut noter que la valeur de n et celle du taux de couverture a sont interdépendantes [18].

La simplicité et la performance de la correction de Yule-Nielsen interroge depuis longtemps. Plusieurs travaux ont tenté de lui trouver une justification physique, soit en modélisant les probabilités de transition de flux d'une primaire à l'autre [27-29], soit en décrivant des marches aléatoires de photons [30-31], soit encore en modélisant la réflexion lumineuse par l'imprimé par la convolution d'une fonction surfacique de transmission spectrale associée à la couche colorante et d'une réponse impulsionnelle de réflexion associée au support [32-33]. A cette dernière approche par convolution de fonctions, Rogers [34-36] ajoute les réflexions internes de flux se produisant sous l'interface air-imprimés, dont le facteur de réflexion pour un éclairage lambertien issu d'un support fortement diffusant avoisine les 60% [37]. Le modèle décrit dans son article [34] fait appel à la théorie du transfert radiatif et parvient à retrouver l'équation de Yule-Nielsen comme cas particulier d'un modèle plus général, mais avec une valeur de n égale à 2 en cas de diffusion isotrope dans le support, ce qui est en contradiction avec les valeurs beaucoup plus élevées expérimentalement observées. Ce modèle théorique, pourtant très élégant, est aussi difficile à mettre en œuvre en pratique² : il s'avère coûteux en temps de calcul et demanderait, pour être réaliste, de prendre en compte la forme réelle des points d'encres dans la trame. Des modèles de transfert radiatif simplifié ont également été développés [38-39], présentant les mêmes difficultés de mise en œuvre.

En cherchant d'autres fonctions empiriques que la fonction $f : x \mapsto x^{1/n}$ qui puissent générer une correction aussi performante que celle de Yule-Nielsen, voire meilleure lorsque cette dernière ne l'est pas suffisamment, j'ai dû constater qu'on n'en trouve pas [21]. Ceci m'a conduit à interroger l'équation de Yule-Nielsen elle-même à partir de concepts optiques simples, et à proposer l'interprétation physique suivante [8] : Admettons que le facteur de réflexion par la primaire i résulte de la réflexion lumineuse par le support, de facteur $\rho(\lambda)$, et d'un filtrage global par la couche colorante de facteur $T_i(\lambda)$:

$$R_i(\lambda) = \rho(\lambda)T_i(\lambda). \quad (4)$$

L'équation (3) devient alors :

$$R_{0.5}(\lambda) = \rho(\lambda) \left[(1-a)T_0^{1/n}(\lambda) + aT_1^{1/n}(\lambda) \right]^n. \quad (5)$$

¹ C'est ce qu'on observe avec des demi-tons inscrits sur verre par laser, voir §. 4.5, p. 63.

² J'ai supervisé le stage de fin d'études de Guillaume Noyel à l'EPFL sur ce sujet en 2005.

En assimilant le facteur de filtrage $T_i(\lambda)$ au facteur de transmission la couche colorante dans une primaire, le terme $T_i^{1/n}(\lambda)$ est celui d'une sous-couche d'épaisseur relative $1/n$. De même, le terme $(1-a)T_0^{1/n}(\lambda) + aT_1^{1/n}(\lambda)$ est le facteur de transmission d'une sous-couche en demi-ton d'épaisseur relative $1/n$. Le fait de porter ce terme à la puissance n signifie que la lumière traverse les n sous-couches identiques en se mélangeant totalement entre chaque sous-couche. Un schéma décrit ce processus dans la Figure 6.

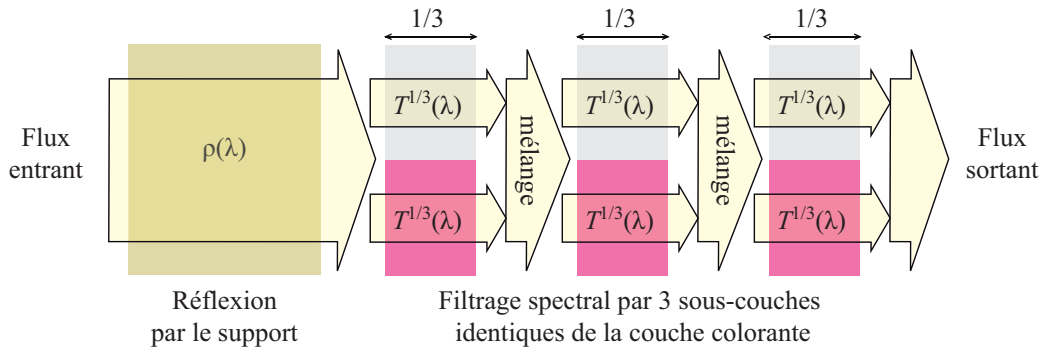


Fig. 6. Interprétation physique de la correction Yule-Nielsen pour $n = 3$, où la lumière traverse n sous-couches de la couche colorante en demi-ton en se mélangeant entre elles.

Ceci est une manière simple de modéliser les trajectoires de photons à travers plusieurs primaires, manifestement en bon accord avec la réalité physique. On comprend que la valeur de n soit proche de 1 en l'absence de diffusion : il n'est pas besoin d'introduire de mélanges de composantes lumineuses à l'intérieur de la couche puisque la lumière n'est pas diffusée. A l'opposé, une fréquence de trame élevée ou une diffusion forte peuvent conduire à une valeur de n infinie. Ceci revient mathématiquement à l'équation multiplicative suivante, récemment notée sans démonstration par Viggiano [25] et prouvée dans notre publication [8] :

$$R_{0.5}(\lambda) = R_0^{1-a}(\lambda)R_1^a(\lambda) = \rho(\lambda)T_0^{1-a}(\lambda)T_1^a(\lambda), \quad (6)$$

La couche colorante devient optiquement homogène comme dans un mélange pigmentaire. Les taux de couverture se retrouvent en exposant des facteurs d'atténuation des primaires et deviennent équivalents à des épaisseurs optiques.

L'équation de Yule-Nielsen étendue à plusieurs encres donne de bonnes prédictions en réflexion pour de nombreux types de supports (diffusants ou transparents) et systèmes d'impression [3]. Les mêmes performances sont constatées avec la version transposée au facteur de transmission que j'ai proposée en 2010 [40], les supports pouvant être imprimés sur leurs deux faces en mode recto-verso. La précision des modèles est encore améliorée avec l'approche dite « cellulaire » [41] consistant à découper l'espace colorimétrique en sous-espaces traités séparément, où certains demi-tons sont considérés comme des tons pleins. Cependant, en se fondant sur une combinaison de facteurs spectraux de réflexion mesurés sans chercher à modéliser la propagation de la lumière dans les matériaux, les modèles de surface ne permettent pas de prédire un facteur de réflexion défini pour une autre géométrie

d'éclairage ou d'observation que celle utilisée pour les mesures de calibration, ni de modéliser les transferts de flux entre l'imprimé et des composants optiques adjacents.

2.4. Modèles physiques « à deux flux »

Si l'appellation « modèle à deux flux » est largement employée pour le modèle Kubelka-Munk – il s'agit alors de flux supposés parfaitement diffus (lambertiens) se propageant dans des directions opposées, perpendiculaires à la couche, dont les inter-échanges sont décrits à l'échelle infinitésimale par des équations différentielles – elle ne l'est pas pour les autres modèles qu'on qualifie plutôt de « modèles de réflexions multiples. » Leur formule de facteur de réflexion dérive d'une description exhaustive des transferts possibles de photons entre les différentes couches et interfaces, laquelle conduit chaque fois à une série géométrique se factorisant en fraction simple. Mais la factorisation devient difficile au-delà de trois éléments superposés. Dans ma thèse de doctorat, j'avais cherché un formalisme générique permettant d'envisager toutes les configurations de superposition permises et de prédire simultanément le facteur de réflexion et de transmission. J'avais conçu pour cela un modèle « compositionnel » basé sur des chaînes de Markov [42]. La théorie de Markov sur les processus aléatoires sans mémoire a l'avantage d'établir clairement que l'approche à deux flux généralisée est réservée, en théorie, aux empilements de couches fortement diffusantes et/ou non diffusantes ; les couches semi-diffusantes et les interfaces rugueuses n'étant permises qu'à condition d'être bordées de couches fortement diffusantes. Par la suite, j'ai adopté un formalisme plus classique basé sur des matrices de transferts, qui fera l'objet du prochain chapitre. En attendant, poursuivons l'état de l'art sur les modèles prédictifs du facteur de réflexion d'imprimés en demi-tons.

Bien que considéré comme un classique de la littérature consacrée aux imprimés en demi-ton, le modèle de Clapper-Yule (1953) [43] a été un peu oublié jusqu'à son extension par Rogers dans les années 1990 [29]. En considérant que la distance de propagation latérale des flux sous les points d'encre est largement supérieure à leur taille – ce qui revient à considérer une réponse impulsionnelle du support très grande devant la période de trame, donc à limiter en théorie son application aux demi-tons de linéature élevée – le modèle de Clapper-Yule conduit à une équation analytique simple décrivant les réflexions multiples de la lumière entre le support et l'interface air-imprimé, selon les paramètres physiques macroscopiques suivants :

- le facteur de réflexion interne $r_g(\lambda)$ du support (considéré sans interface),
- les facteurs de transmission internes $t_i(\lambda)$ des primaires (considérés sans interface),
- les facteurs de réflexion et transmission de Fresnel pour l'interface calculés en fonction de la géométrie d'éclairage (diffus ou collimaté à un certain angle), de l'angle d'observation, et de l'indice de l'imprimé, généralement supposé égal à 1,5 sur tout le spectre visible : r_s correspond à la réflexion côté air, T_{in} à la transmission air-imprimé, T_{ex} à la transmission imprimé-air, et r_i à la réflexion côté imprimé.

Dans le cas des deux primaires utilisées avec l'équation de Yule-Nielsen, l'équation de Clapper-Yule s'écrit :

$$R_{0.5}(\lambda) = r_s + \frac{T_{in}T_{ex}[(1-a)t_0(\lambda) + at_1(\lambda)]^2}{1 - r_iT_{in}T_{ex}[(1-a)t_0^2(\lambda) + at_1^2(\lambda)]}. \quad (7)$$

Ce modèle n'a pas le paramètre libre n de l'équation Yule-Nielsen pour rendre compte de l'influence de fréquence de trame, mais il a l'avantage de pouvoir prendre en compte la géométrie de mesure et d'être directement connecté avec des phénomènes physiques macroscopiques tels les transferts de flux avec d'autres composants optiques.

Une partie de ma thèse était destinée à montrer que le modèle de Clapper-Yule s'insère dans une famille plus large de modèles à deux flux généralisés aux empilements de couches fortement diffusantes et/ou non diffusantes. Dans cette famille de modèles, on peut inclure, pour ne citer que des modèles classiques, le modèle de Kubelka-Munk (1931) applicable à une couche de matériau diffusant [44-45], sa correction de Saunderson (1942) pour la prise en compte des interfaces avec l'air [46], le modèle de Kubelka (1954) pour la superposition de couches diffusantes [47], le modèle de Williams-Clapper (1953) dédié aux tirages photographiques sur papier [48], le modèle de Berns (1993) dédié à l'impression par diffusion thermique de colorant [49]... Chacun de ces modèles se distingue par une combinaison spécifique des couches diffusantes et colorantes, décrite dans la Figure 7. La mise en commun de tous ces modèles m'aura permis d'aborder, avec les doctorants que j'ai supervisés, les configurations d'impression recto-verso et l'empilement de films imprimés qui n'avaient jamais été considérées jusqu'alors.

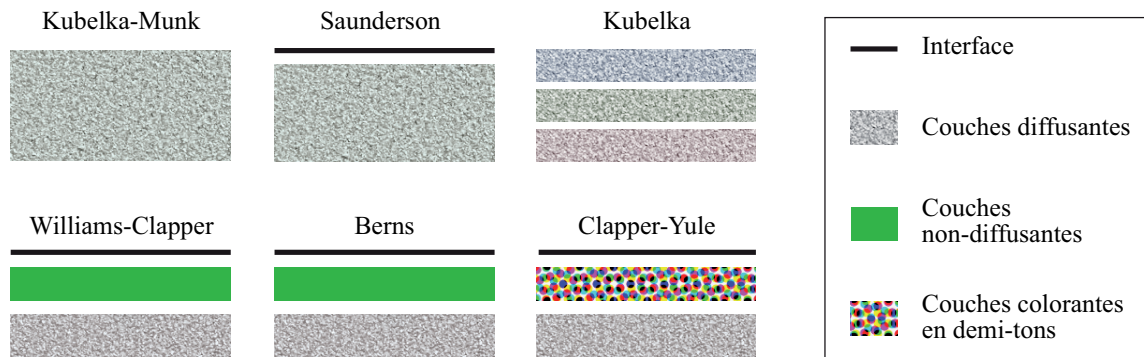


Fig. 7. Configurations d'éléments empilés dans les modèles à deux flux classiques.

Notons que dans les configurations contenant une couche non-diffusante, l'atténuation spectrale d'un flux diffus traversant celle-ci n'est pas toujours décrite de la même manière :

- les modèles « orientationnels » décrivent explicitement l'atténuation de chaque luminance composant un flux diffus en fonction de sa direction de propagation ; c'est le cas du modèle Williams-Clapper originellement conçu pour les tirages photographiques argentiques dont la couche de gélatine est très translucide, de même que des extensions auxquelles j'ai contribué pour remplacer la couche colorante uniforme par une couche en demi-ton [50-51] ou un revêtement multicouche non-diffusant [52-53].
- les modèles « non-orientationnels » attribuent à tout flux traversant la couche colorante un même facteur d'atténuation, indépendamment de sa distribution angulaire, ce qui fait sens

quand la couche d'encre est diffusante car la lumière ne peut y suivre une seule direction ; les modèles de Berns et de Clapper-Yule sont de cette catégorie.

L'expérience montre que l'approche orientationnelle peut donner des prédictions légèrement meilleures avec des encres très translucides et un support imperméable (ex. impression jet d'encre sur papier qualité photo, ou impression sur support plastique [54]), mais moins bonnes dans les autres cas [32].

2.5. Conclusion

Pour résumer l'état de l'art sur les modèles prédictifs du facteur spectral de réflexion de surfaces imprimées, on peut dire que des performances satisfaisantes sont avérées lorsqu'on considère :

- des supports fortement diffusants ou très translucides ; les performances sont moindres avec les supports semi-transparents comme le papier calque,
- des encres translucides de couleur quelconque, possiblement fluorescentes [55], dont le nombre peut monter jusqu'à 6 ou 10,
- des trames de demi-tons classiques : périodiques à points centrés, stochastiques... ; ou des microstructures en couleur.

Mes travaux de 2006 à 2011 ont montré qu'il est possible de prédire le facteur de transmission avec une précision comparable à celle du facteur de réflexion, *a priori* pour les mêmes types de support, encres et trames, même si les microstructures et encres fluorescentes n'ont pas encore été testées.

Ces modèles existants constituent le point de départ des modèles que j'ai développés pour des configurations d'impression plus originales incorporant plusieurs couches colorantes en demi-tons.

2.6. Références

1. H. Kipphan, *Handbook of Print Media*, Springer (2001).
2. H. R. Kang, "Applications of color mixing models to electronic printing," *J. Electron. Imaging* **3**, 276–287 (1994).
3. M. Hébert, R. D. Hersch, "Review of spectral reflectance prediction models for halftone prints: calibration, prediction and performance," *Color Res. Appl.*, paper 21907 (2014).
4. S. G. Wang, "Two-by-Two Centering Printer Model with Yule-Nielsen Equation," *Proc. IS&T International Conference on Digital Printing Technologies*, 302–305 (1998).
5. V. Babaei, R. Rossier, R. D. Hersch, "Reducing the number of calibration patterns for the two-by-two dot centering model," *Proc. SPIE* **8292**, paper 829208 (2012).
6. Y. Chen, R. S. Berns, L. A. Taplin, F. H. Imai, "A Multi-Ink Color-Separation Algorithm," *Proc. IS&T/SID 11th Color Imaging Conference*, 277–281 (2003).
7. D. Steen, D. Dupont, J.-F. Bloch, "Reproduction et contrôle de la couleur," in *La couleur – Lumière, Vision et Matériaux*, Ed. M. Elias, J. Lafait, Belin, pp. 324–336 (2006).
8. M. Hébert, D. Nébouy, S. Mazaauric, "Color and spectral mixings in printed surfaces," *LNCS* **9016** Computational Color Imaging Workshop, 3–15 (2015).

9. R.D. Hersch, M. Hébert, "Base models for color halftone reproduction," in *Handbook of Digital Imaging*, Vol. 2, Ed. Mickael Kriss, Wiley, pp. 1079–1132 (2015).
10. J. A. C. Yule, W. J. Nielsen, "The penetration of light into paper and its effect on halftone reproduction," *Proc. TAGA* **3**, 65–76 (1951).
11. M. Ukishima, *Prediction and evaluation of color halftone print quality based on microscopic measurement*, Ph. D. dissertation, University of Eastern Finland (2010).
12. G. M. A. Rahaman, O. Norberg, P. Edström, "Microscale halftone color image analysis: perspective of spectral color prediction modeling," *Proc. SPIE* **9015**, Paper 901506 (2014).
13. D. Nyström, *High Resolution Analysis of Halftone Prints : A Colorimetric and Multispectral Study*, PhD dissertation, Linköping University, Sweden, 2009.
14. D. Nyström, L. Yang, "Physical and Optical Dot Gain: Separation and Relation to Print Resolution," *Advances in Printing and Media Technology* **36** (2009).
15. M. Namedanian, *Characterization of Halftone Prints based on Microscale Image Analysis*, PhD dissertation, Linköping University, Suède (2013).
16. M. Namedanian, D. Nyström, P. Z. Elias, S. Gooran, "Physical and optical dot gain: characterization and relation to dot shape and paper properties," *Proc. SPIE* **9015**, paper 9509–09 (2014).
17. R. D. Hersch, F. Crété, "Improving the Yule-Nielsen modified spectral Neugebauer model by dot surface coverages depending on the ink superposition conditions," *Proc SPIE* **5667**, 434–445 (2005).
18. M. Hébert, R. D. Hersch, "Analyzing halftone dot blurring by extended spectral prediction models," *J. Opt. Soc. Am. A* **27**, 6–12 (2010).
19. H. E. J. Neugebauer, "Die theoretischen Grundlagen des Mehrfarbendrucks," *Zeitschrift fuer wissenschaftliche Photographie* **36**, 36–73, (1937), translated into English: "The theoretical basis of multicolour letterpress printing," *Color Res. App.* **30**, 322–331 (2005).
20. A. Murray, "Monochrome reproduction in photoengraving," *J. Franklin Institute* **221**, 721–724 (1936).
21. M. Hébert, "Yule–Nielsen effect in halftone prints: graphical analysis method and improvement of the Yule-Nielsen transform," *Proc. SPIE* **9015**, Paper 90150R (2014).
22. J. A. S. Viggiano, "The Color of Halftone Tints," *Proc. TAGA*, 647–661 (1985).
23. A. Lewandowski, M. Ludl, G. Byrne, G. Dorffner, "Applying the Yule–Nielsen equation with negative n" *J. Opt. Soc. Am. A* **23**, 1827–1834 (2006).
24. J. A. S. Viggiano, "Physical significance of negative Yule-Nielsen n-value," *Proc. ICIS International Congress of Imaging Science*, 607–610 (2006).
25. J. A. S. Viggiano, "Ink Penetration, Isomorphic Colorant Mixing, and Negative Values of Yule-Nielsen n," *Proc. IS&T 18th Color and Imaging Conference*, 285–290 (2010).
26. J. Machizaud, M. Hébert, "Spectral reflectance and transmittance prediction model for stacked transparency and paper both printed with halftone colors," *J. Opt. Soc. Am. A* **29**, 1537–1548 (2012).
27. J. S. Arney, "A probability description of the Yule-Nielsen effect, I: Tone reproduction and image quality in the graphic arts," *J. Im. Sci. Technol.* **41**, 633–636 (1997).
28. J. S. Arney, M. Kutsube, "A probability description of the Yule-Nielsen effect. II : The impact of halftone geometry : Tone reproduction and image quality in the graphic arts," *Recent Progress in Digital Halftoning II* **41**, 637–642 (1999).
29. G. Rogers, "Optical dot gain: lateral scattering probabilities," *J. Imaging Sci. Technol.* **42**, 495–500 (1998).
30. M. Vöge, K. Simon, "The Kubelka–Munk model and Dyck paths," *J. Stat. Mech.*, paper P02018 (2007).
31. Li Yang, "Probabilistic spectral model of color halftone incorporating substrate fluorescence and interface reflections," *J. Opt. Soc. Am. A* **27**, 2115–2122 (2010).
32. F. R. Ruckdeschel, O. G. Hauser, "Yule-Nielsen effect in printing: a physical analysis," *Appl. Opt.* **17**, 3376–3383 (1978).
33. A. U. Agar, "Model for halftone color prediction from microstructure," *Proc. SPIE* **4300**, Color Imaging: Device-Independent Color, Color Hardcopy, and Graphic Arts VI, 416 (2000).
34. G. L. Rogers, "The Point Spread Function and Optical Dot Gain," in *Handbook of Digital Imaging*, Vol. 2, Ed. Mickael Kriss, Wiley, pp. 1133–1164 (2015).
35. G. L. Rogers, "Effect of light scatter on halftone color," *J. Opt. Soc. Am. A* **15**, 1813–1821 (1998).
36. G. L. Rogers, "A Generalized Clapper–Yule Model of Halftone Reflectance," *Color Res. Appl.* **25**, 402–407 (2000).

37. D. B. Judd, "Fresnel Reflection of Diffusely Incident Light," *J. Res. Natl. Bur. Stand.* **29**, 329–332 (1942).
38. S. Mourad, P. Emmel, K. Simon, R. R. Hersch, "Prediction of Monochrome Reflectance Spectra with an Extended Kubelka-Munk Model," *Proc. IS&T/SID 10th Color Imaging Conference*, 298–304 (2002).
39. L. Simonot, L. Signac, D. Meneveaux, M. Hébert, "Modélisation de la diffusion multiple de la lumière dans un réseau cubique selon une approche discrète," rapport de recherches, Université de Poitiers, Université Jean Monnet de Saint-Etienne (2014). <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01077439>>.
40. M. Hébert, R. D. Hersch, "Yule-Nielsen based recto-verso color halftone transmittance prediction model," *Appl. Opt.* **50**, 519–525 (2011).
41. K. J. Heuberger, Z. M. Jing, S. Persiev, "Color Transformations and Lookup Tables," *Proc. TAGA/ISCC 1992*, 863–881 (1992).
42. M. Hébert, R. D. Hersch, J. -M. Becker, "Compositional reflectance and transmittance model for multilayer specimens," *J. Opt. Soc. Am. A* **24**, 2628–2644 (2007).
43. F. R. Clapper and J. A. C. Yule, "The Effect of Multiple Internal Reflections on the Densities of Halftone Prints on Paper," *J. Opt. Soc. Am.* **43**, 600–603 (1953).
44. P. Kubelka, F. Munk, "Ein Beitrag zur Optik der Farbanstriche," *Zeitschrift für technische Physik* **12**, 593–601 (1931).
45. P. Kubelka, "New contributions to the optics of intensely light-scattering material, part I," *J. Opt. Soc. Am.* **38**, 448–457 (1948).
46. J. L. Saunderson, "Calculation of the color pigmented plastics," *J. Opt. Soc. Am.* **32**, 727–736 (1942).
47. P. Kubelka, "New contributions to the optics of intensely light-scattering materials, part II: Non homogeneous layers," *J. Opt. Soc. Am.* **44**, 330–335 (1954).
48. F. C. Williams, F. R. Clapper, "Multiple Internal Reflections in Photographic Color Prints," *J. Opt. Soc. Am.* **43**, 595–597 (1953).
49. R. S. Berns, "Spectral modeling of a dye diffusion thermal transfer printer," *J. Electron. Imaging* **2**, 359–370 (1993).
50. M. Hébert, R. D. Hersch, "Reflectance and transmittance model for recto-verso halftone prints," *J. Opt. Soc. Am. A* **23**, 2415–2432 (2006).
51. M. Hébert, R. D. Hersch, "Reflectance and transmittance model for recto-verso halftone prints: spectral predictions with multi-ink halftones," *J. Opt. Soc. Am. A* **26**, 356–364 (2009).
52. M. Hébert, R. D. Hersch, Lionel Simonot, "Spectral prediction model for piles of nonscattering sheets," *J. Opt. Soc. Am. A* **25**, 2066–2077 (2008).
53. L. Simonot, M. Hébert, R. D. Hersch, "Extension of the Williams-Clapper model to stacked nondiffusing colored coatings with different refractive indices," *J. Opt. Soc. Am. A* **23**, 1432–1441 (2006).
54. M. Hébert, R. D. Hersch, "Deducing ink-transmittance spectra from reflectance and transmittance measurements of prints," *Proc. SPIE* **6493**, paper 649314 (2007).
55. R. Rossier, R. D. Hersch, "Hiding patterns with daylight fluorescent inks," *Proc. IS&T 19th Color and Imaging Conference*, 223–228 (2011).

Chapitre 3.

Modèles de transferts de flux

Ce chapitre aborde mes principales contributions à l'état de l'art en modélisation dans le domaine de la reproduction des couleurs, avec les modèles permettant de prédire les facteurs spectraux de réflexion et de transmission d'imprimés recto-verso et d'empilements d'imprimés. Le modèle de Yule-Nielsen introduit précédemment peut s'appliquer à l'impression recto-verso sur support très diffusant ou transparent, mais pas aux empilements. Le modèle à deux flux généralisé que nous avons développé est au contraire bien adapté à des couches superposées de matériaux d'impression courants, c'est-à-dire fortement diffusantes et/ou non-diffusantes. Simple à calibrer à partir de mesures macroscopiques, ce dernier permet aussi de prendre en compte les conditions d'illumination et d'observation. Il a fait l'objet d'un chapitre d'ouvrage paru en 2015 [1]. Les flux considérés sont :

- lambertiens si tous les milieux sont diffusants ;
- directionnels si tous les milieux et interfaces sont non-diffusants – le modèle prédit alors les facteurs spectraux angulaires de transfert¹ en fonction de l'angle d'incidence de la lumière, pour les composantes de polarisation TM et TE ; on peut ensuite sommer les deux facteurs associés aux deux composantes de polarisation si la lumière incidente est naturelle (ce qui est toujours le cas dans nos applications) et intégrer le facteur angulaire obtenu suivant une distribution angulaire quelconque de la lumière incidente ;
- hybrides lorsque des éléments diffusants et non-diffusants sont superposés, en suivant l'approche orientationnelle ou non concernant la propagation des flux dans les couches non-diffusantes (voir § 2.4, p. 32).

3.1. Matrices de transfert

Les matrices de transfert de flux sont un outil mathématique très commode pour décrire la propagation de la lumière dans un milieu stratifié. Celles que nous utilisons pour des flux incohérents, apparentées à celles introduites par Abelès [2] pour décrire la propagation d'ondes cohérentes dans les couches minces, peuvent se trouver dans des travaux cherchant à rendre compte de la propagation de lumière devenue incohérente dans des couches minces [3-6], ou plus rarement dans des travaux relatifs aux revêtements (épais) de surfaces [7]. Nous les utilisons de manière systématique dans nos programmes de calcul depuis 2007 pour les calculs de facteur de réflexion/transmission de supports imprimés, même si nous avons souvent choisi dans nos publications d'autres formalismes plus conformes aux méthodes

¹ Dans ce chapitre, nous désignerons par « transfert » une réflexion ou une transmission lumineuse, et par « facteur de transfert » un facteur de réflexion ou de transmission.

usitées dans la littérature en reproduction des couleurs : les matrices de transfert n'ont jamais été utilisées pour les imprimés avant la parution de notre article en 2014 [8], même si le formalisme matriciel pour le modèle Kubelka-Munk [9-10] que Patrick Emmel a introduit à la fin des années 1990 a un lien direct avec nos matrices de transfert, mis en évidence dans le chapitre que nous avons rédigé conjointement [1].

Les matrices de transfert relient les valeurs des flux se propageant vers l'avant (I) et vers l'arrière (J) à chaque étage du système multicouche :

$$\begin{pmatrix} I_0 \\ J_0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\tau} \begin{pmatrix} 1 & -\rho' \\ \rho & \tau\tau' - \rho\rho' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ J_1 \end{pmatrix} \quad \text{ou} \quad \begin{pmatrix} I_1 \\ J_1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\tau'} \begin{pmatrix} \tau\tau' - \rho\rho' & \rho' \\ -\rho & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_0 \\ J_0 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

où ρ et τ représentent les facteurs de réflexion et de transmission de l'élément éclairé d'un côté, ρ' et τ' ceux de l'élément éclairé de l'autre côté (Figure 8).

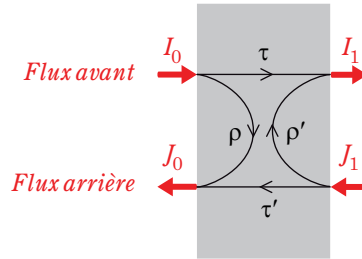


Fig. 8. Transferts de flux par un élément optique plan (couche ou interface).

Pour une superposition d'éléments, il suffit de multiplier leurs matrices en respectant l'ordre de superposition. A partir d'une matrice $\mathbf{M} = \{m_{ij}\}$ donnée, obtenue par exemple en multipliant plusieurs matrices de transfert élémentaires, on retrouve facilement les facteurs de transfert par les formules suivantes :

$$\begin{aligned} \rho &= m_{21} / m_{11} & \tau &= 1 / m_{11} \\ \rho' &= -m_{12} / m_{11} & \tau' &= \det(\mathbf{M}) / m_{11} \end{aligned}$$

Dans le cas des couches non-diffusantes, les facteurs de réflexion sont nuls (la matrice est diagonale) et les facteurs de transmission sont donnés par la loi de Beer. Dans le cas des interfaces, les facteurs de transfert sont dérivés des formules de Fresnel en considérant la distribution angulaire de la lumière incidente : directionnelle à un angle donné, ou lambertienne. Lorsque des luminances obliques parviennent à l'interface avec un milieu moins réfringent, elles peuvent être sujettes à réflexion totale par l'interface. Le facteur de transmission est donc nul, ce qui pose un problème numérique évident si on regarde la définition des matrices dans l'équation (8). Ce fait est rarement traité dans la littérature, probablement parce que les couches minces ont souvent vocation à être éclairées depuis des directions proches de leur normale. Or dans nos applications, des flux parfaitement diffus sont couramment considérés. J'ai donc émis la recommandation d'utiliser des matrices 3×3 qui se multiplient de la même manière que les matrices 2×2 , mais sans risque de division par zéro :

$$\begin{pmatrix} 1 & -\rho' & 0 \\ \rho & \tau\tau' - \rho\rho' & 0 \\ 0 & 0 & \tau \end{pmatrix}. \quad (9)$$

On peut attribuer une matrice à un support complet, interfaces et revêtements compris, en utilisant directement ses facteurs de transferts mesurés. La matrice de transfert associée à un empilement de supports est alors le produit de leurs matrices individuelles. Il est intéressant de mettre le modèle théorique à l'épreuve de spécimens réels, ce que nous avons réalisé à travers des films transparents teintés dans la masse, des films transparents imprimés en demi-ton, des films imprimés sur papier imprimé, et des imprimés recto-verso.

3.2. Empilement d'éléments non-diffusants identiques

La première configuration d'empilement testée a porté sur des feuilles d'acétate transparent de couleur cyan¹ [11]. L'épaisseur des feuilles, une centaine de micromètres environ, est telle que la lumière peut être considérée temporellement incohérente. Ces feuilles sont symétriques : leurs deux faces ont le même facteur de réflexion. A partir des facteurs de transfert d'une feuille mesurés à incidence normale, on peut déduire le facteur spectral de transmission interne de la couche d'acétate et estimer son indice, généralement supposé réel et constant sur le spectre visible. On peut alors prédire pour tout angle d'incidence les facteurs angulaires de réflexion et de transmission d'une feuille, puis de feuilles empilées. Des empilements de 2 à 5 feuilles ont été considérés. On peut également placer la pile sur un fond diffusant ; le flux éclairant la pile du côté du fond est Lambertien. On peut calculer le *facteur de luminance*² du système {pile + fond} pour une géométrie d'éclairage-observation donnée, par exemple un éclairage diffus et une observation perpendiculairement à la pile, géométrie notée d:0° selon la convention recommandée par la CIE. Les facteurs de transfert de la pile pour les distribution angulaires de flux parvenant de chaque côtés sont calculés à partir des facteurs angulaires précédemment obtenus. La Figure 9 compare les facteurs spectraux de luminance mesurés et prédits pour des feuilles placées devant deux fonds différents. Les performances prédictives sont satisfaisantes, puisque les écarts colorimétriques correspondant aux écarts spectraux, exprimés en unités CIELAB ΔE_{94} , sont inférieurs à 0.5. Le seuil de différence perceptible est supposé se situer autour de 1.

Le comportement optique de ces échantillons, dont le revêtement colorant n'est pourtant pas diffusant, est très proche de celui des glaciés, œuvres peintes selon la technique mise au point par les primitifs flamands qui consiste à déposer plusieurs couches d'une peinture à l'huile très translucide sur un fond diffusant [13]. La diffusion par les pigments remplace dans ce cas la rétro-réflexion spéculaire par les interfaces de films de notre expérience. On retrouve dans

¹ Dans la publication originale [11], le modèle est décrit par composition itérative de formules selon la méthode de Kubelka [12]. La version par matrices de transferts est publiée dans le chapitre d'ouvrage [1].

² *Reflectance factor* en anglais : rapport entre la luminance réfléchie par l'échantillon dans une direction donnée et celle mesurée sur un réflecteur blanc lambertien dans les mêmes conditions de mesure ; il peut être supérieur à 1 et est à distinguer du facteur de réflexion (*Reflectance*), rapport entre le flux incident et le flux réfléchi, qui lui est inférieur à 1.

les deux cas l'existence d'une épaisseur optimale pour laquelle la saturation de la couleur est la plus élevée [14], et une compétition entre la diffusion/rétro-réflexion et l'absorption qui peut accroître ou diminuer le facteur de luminance de la surface – lequel peut rester constant lorsque les deux phénomènes s'équilibrent parfaitement (voir Figure 9-*b* à 500 nm).

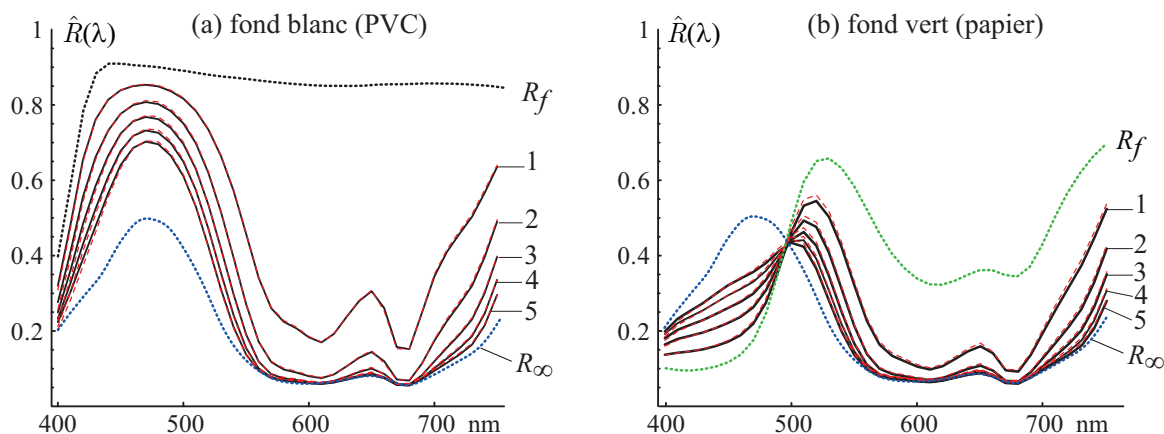


Fig. 9. Facteurs de luminance (éclairement diffus, observation à 0°) de feuilles d'acétate transparent cyan empilées sur un fond diffusant blanc (à gauche) ou vert (à droite) de facteur de réflexion $R_f(\lambda)$. Les spectres prédits sont tracés en lignes pointillées rouges, ceux mesurés, en lignes pleines noires.

Afin d'observer l'influence des indices optiques, nous avons introduit des milieux transparents entre les feuilles pour modifier l'indice relatif des interfaces. Par défaut, les feuilles sont séparées par de l'air, que nous avons remplacé par un liquide d'indice 1,4 ou de l'huile d'indice 1,5. Les variations de facteurs de transfert pour les piles de feuilles, présentées dans la Figure 10, sont notables. Les différences de couleur d'un spectre à l'autre sont également bien visibles. Pour les étudiants ou les industriels, cette expérience est très didactique car elle illustre bien les mécanismes incohérents d'absorption et de retro-réflexion (forme collimatée de rétrodiffusion). Il suffit d'utiliser des films similaires d'une autre couleur pour modifier l'absorption sans modifier la retro-réflexion, ou de changer le milieu entre les films pour modifier la retro-réflexion sans modifier l'absorption. Dans tous les cas, on peut observer l'influence de l'épaisseur en empilant plus ou moins de films. L'expérience permet donc de varier l'absorption, la retro-réflexion et l'épaisseur indépendamment les uns des autres. Bien entendu, ces phénomènes se complexifient dans les milieux turbides, mais varient néanmoins de manière similaire en fonction des mêmes paramètres. On parvient ainsi à mieux comprendre les changements de couleur observés sur une poudre de pigments ou un textile lorsqu'on le mouille avec de l'eau ou de l'huile, ou à comprendre pourquoi le papier huilé devient translucide.

Après cette étude, la question était de savoir si le modèle est aussi performant avec des films transparents imprimés en demi-ton. J'avais confié cette question comme sujet de projet à des étudiants du master Optique Image Vision, à partir de films imprimés par jet d'encre avec une trame stochastique pour éviter les phénomènes de moirés. La différence avec les films d'acétate est que, du fait d'un phénomène de bronzage par les couches d'encres (voir le § 3.6

consacré à ce phénomène, p. 47), les films imprimés ne sont plus symétriques. En tenant compte de cette dissymétrie en mesurant les facteurs de réflexion et de transmission des deux côtés du film, on parvient à des prédictions très correctes pour des piles allant jusqu'à seize films, en réflexion et en transmission [15].

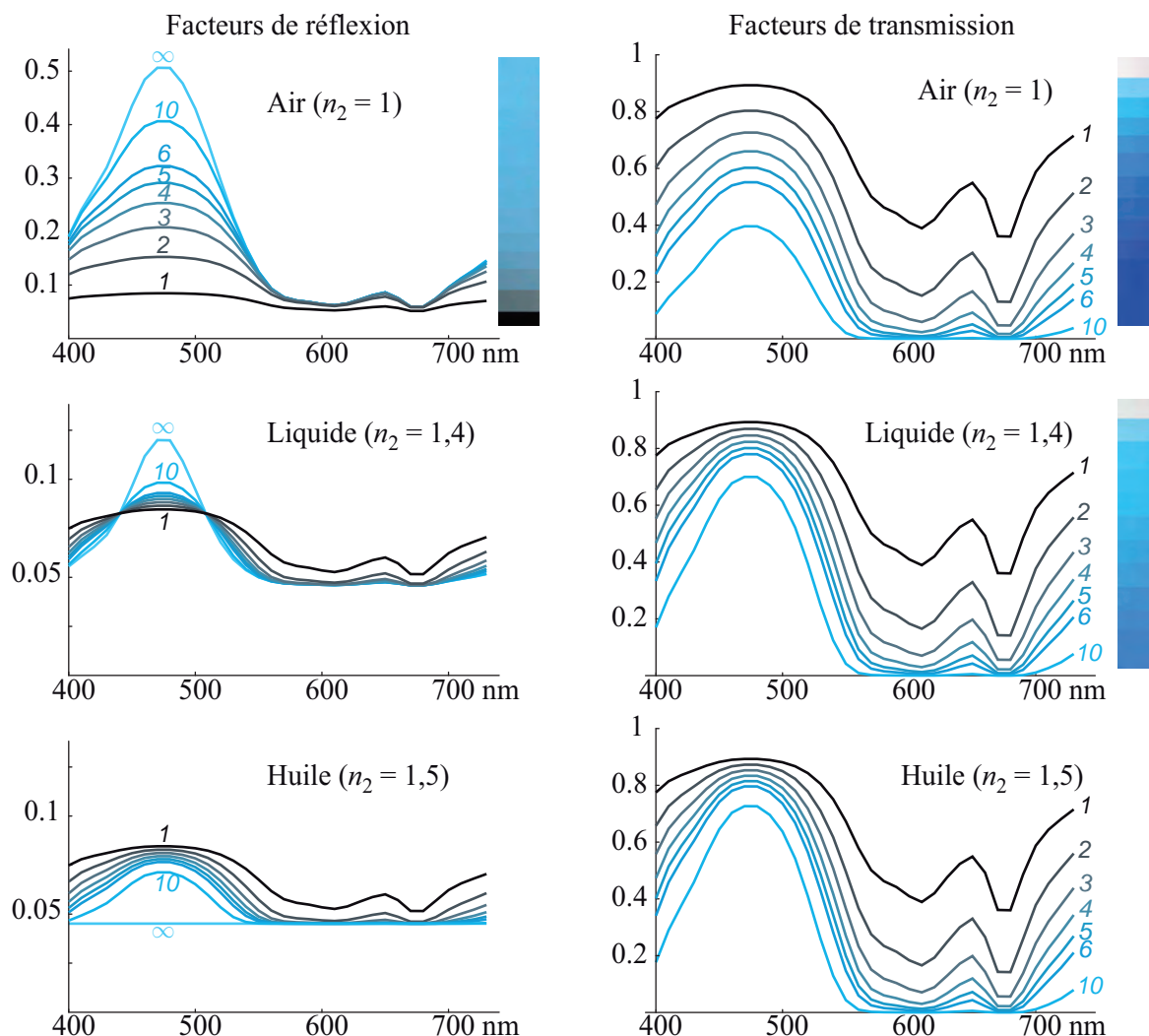


Fig. 10. Facteurs spectraux de réflexion (colonne de gauche) et de transmission (colonne de droite) de feuilles d'acétates empilées et séparées par un milieu d'indice n_2 pouvant être de l'air, un liquide ou de l'huile. Les chiffres indiquent le nombre de feuilles empilées [1, 52]. Les trois images latérales sont chacune extraites d'une photographie d'empilement progressif de films.

Par la suite, Jacques Machizaud a réalisé durant sa thèse des expériences concluantes sur la superposition de films imprimés de différentes couleurs, en prédisant d'abord les facteurs de transfert de chaque film à l'aide d'un modèle pour demi-tons (modèle Yule-Nielsen avec une valeur de n proche de 2 pour rendre compte de la faible diffusion par les encres, qui induit un engraissement optique non négligeable), puis les facteurs de transfert des films empilés [16]. Les performances prédictives sont suffisamment bonnes pour envisager d'inverser le modèle et définir différentes combinaisons de couleurs à imprimer sur les films de manière à obtenir une même couleur après empilement en transmission (voir Figure 20, p. 59). Par ailleurs, avec

des étudiants de l'Institut d'Optique – Graduate School, nous nous sommes intéressés à l'empilement de films imprimés avec une trame périodique (ligne) présentant une figure de moiré. Nous avons pu prédire les facteurs spectraux de réflexion présents dans la figure de moiré avec une bonne précision.

3.3. Équations de Kubelka-Munk généralisées

L'empilement d'éléments identiques traité par matrices de transfert présente aussi un intérêt théorique, car le formulaire généralisé pour les facteurs de transferts de piles présenté dans la Table 1 finalise la réunification des modèles « de réflexions multiples » et du modèle « à deux flux » de Kubelka et Munk [17]. La généralisation consiste en fait à décliner le célèbre formulaire Kueblka-Munk en versions discrètes et continues pour des piles d'éléments identiques, symétriques et non-symétriques. Le modèle original de Kubelka-Munk, conçu pour une couche diffusante homogène, donc à un empilement de sous-couches identiques symétriques, correspond à la version « continue-symétrique ».

Nous avons d'abord montré en 2007 [18] qu'on peut retrouver les formules de facteurs de réflexion et de transmission de Kubelka-Munk avec des matrices de transfert en subdivisant une couche diffusante homogène d'épaisseur h en N sous-couches identiques d'épaisseur h/N . Quand N est suffisamment grand pour que l'épaisseur de chaque sous-couche puisse être supposée infinitésimale, on peut considérer, selon le modèle original de Kubelka-Munk, que ses facteurs de réflexion et de transmission sont respectivement $R=S(h/N)$ et $T=1-(K+S)(h/N)$, où K et S sont les coefficients d'absorption, respectivement de diffusion du milieu. En construisant la matrice à partir de ces facteurs de transfert et en la portant à la puissance N , on obtient la matrice de transfert de la couche entière. Ce calcul, analytique, est facilité par la diagonalisation de la matrice élémentaire, qui permet de n'appliquer l'exposant N qu'aux valeurs propres dans la matrice diagonale. On fait ensuite tendre N vers l'infini, et on déduit de la matrice de transfert obtenue les facteurs de transfert de la couche entière.

Cette modélisation par sous-couches est la version discrète du modèle à deux flux, le modèle original de Kubelka-Munk dérivé par calcul différentiel en étant la version continue. On retrouve cette approche discrète dès le début du vingtième siècle avec les travaux de Stokes (1904) [19], puis de Kubelka [12] et Kortüm [20]. Bodo [21] fut un des premiers à modéliser la diffusion simple par une large particule, puis considérer un empilement de « plans de particules » pour modéliser la diffusion multiple dans une poudre, une approche généralisée plus tard par Van de Hulst avec la méthode « *adding-doubling* » pour résoudre l'équation de transfert radiatif [22-23]. Sur le même principe, le modèle de Melamed (1963) [24] permet de prédire la couleur de boues pigmentaires en tenant compte explicitement de l'indice de réfraction du liant. Plusieurs extensions ont ensuite été proposées visant à raffiner le modèle de diffusion simple [25-28], dont une à laquelle j'ai contribué [29]. On obtient alors les valeurs de flux à des profondeurs discrètes dans le milieu. Si la diffusion multiple est suffisamment forte, on sait que les valeurs de flux avant et arrière données par les modèles discret et continu sont identiques ; considérer les valeurs de flux dans une sous-couche d'épaisseur inférieure à celle d'un élément revient alors à faire une interpolation de type

Table 1. Formulaire du modèle à deux flux généralisé et du modèle Kubelka-Munk.

<i>Élément simple</i>	Modèle discret	Modèle Kubelka-Munk	Modèle discret	Modèle Kubelka-Munk généralisé
Coefficients	Élément symétrique	Sous-couche d'épaisseur h/N Absorption : K , diffusion : S	Quelconque	Sous-couche d'épaisseur h/N Absorption : K et K' , diffusion : S et S'
Facteurs de transfert d'un élément	r, t	$r = S \frac{h}{N}, \quad t = 1 - (K + S) \frac{h}{N}$	r, t r', t'	$r = S \frac{h}{N}, \quad t = 1 - (K + S) \frac{h}{N}$ $r' = S' \frac{h}{N}, \quad t' = 1 - (K' + S') \frac{h}{N}$
Matrice de transfert d'un élément	$\frac{1}{t} \begin{pmatrix} 1 & -r \\ r & t^2 - r^2 \end{pmatrix}$	$\frac{1}{t} \begin{pmatrix} 1 & -r \\ r & t^2 - r^2 \end{pmatrix}$	$\frac{1}{t} \begin{pmatrix} 1 & -r' \\ r & tt' - rr' \end{pmatrix}$	$\frac{1}{t} \begin{pmatrix} 1 & -r' \\ r & tt' - rr' \end{pmatrix}$
Valeurs propres de la matrice de transfert	$\mu = \frac{1}{t} [1 - r(\alpha + \beta)]$ $\nu = \frac{1}{t} [1 - r(\alpha - \beta)]$	$\mu = \frac{1 - S(\alpha + \beta)h/N}{1 - (K + S)h/N}$ $\nu = \frac{1 - S(\alpha - \beta)h/N}{1 - (K + S)h/N}$	$\mu = \frac{1}{t} [1 - \sqrt{rr'}(\alpha + \beta)]$ $\nu = \frac{1}{t} [1 - \sqrt{rr'}(\alpha - \beta)]$	$\mu = \frac{1 - \sqrt{SS'}(\alpha + \beta)h/N}{1 - (K + S)h/N}$ $\nu = \frac{1 - \sqrt{SS'}(\alpha - \beta)h/N}{1 - (K + S)h/N}$
α, a	$\alpha = \frac{1 + r^2 - t^2}{2r}$	$a = \lim_{N \rightarrow \infty} \alpha = \frac{K + S}{S}$	$\alpha = \frac{1 + rr' - tt'}{2\sqrt{rr'}}$	$a = \lim_{N \rightarrow \infty} \alpha = \frac{K + K' + S + S'}{2\sqrt{SS'}}$
β, b	$\beta = \sqrt{\alpha^2 - 1}$	$b = \sqrt{a^2 - 1}$	$\beta = \sqrt{\alpha'^2 - 1}$	$b = \sqrt{a'^2 - 1}$
<i>Éléments empilés</i>		Couche d'épaisseur h (N couches, avec $N \rightarrow \infty$)		Couche d'épaisseur h (N couches, avec $N \rightarrow \infty$)
Facteurs de transfert de l'empilement	Empilement de x éléments $R = \frac{(v^x - \mu^x)}{v^x(\alpha + \beta) - \mu^x(\alpha - \beta)}$ $T = \frac{2\beta}{v^x(\alpha + \beta) - \mu^x(\alpha - \beta)}$	Empilement de x éléments $R = \frac{\sinh(bSh)}{a \sinh(bSh) + b \cosh(bSh)}$ $T = \frac{b}{a \sinh(bSh) + b \cosh(bSh)}$	Empilement de x éléments $R = \frac{(v^x - \mu^x)\sqrt{r'/r}}{v^x(\alpha + \beta) - \mu^x(\alpha - \beta)}$ $T = \frac{2\beta}{v^x(\alpha + \beta) - \mu^x(\alpha - \beta)}$ $R' = (r'/r)R$ $T' = (t'/t)^x T$	$R = \frac{\sqrt{S/S'} \sinh(b\sqrt{SS'}h)}{a \sinh(b\sqrt{SS'}h) + b \cosh(b\sqrt{SS'}h)}$ $T = \frac{be^{-(K+S)h/2} e^{(K'+S')h/2}}{a \sinh(b\sqrt{SS'}h) + b \cosh(b\sqrt{SS'}h)}$ $R' = (S'/S)R$ $T' = be^{(K+S)h} e^{-(K'+S')h} T$
Facteur de réflexion d'une pile semi-infinie	$R_\infty = \alpha - \beta = \frac{1}{\alpha + \beta}$	$R_\infty = a - b = \frac{1}{a + b}$	$R_\infty = \sqrt{r'/r}(\alpha - \beta) = \frac{\sqrt{r'/r}}{\alpha + \beta}$	$R_\infty = \sqrt{S/S'}(a - b) = \frac{\sqrt{S/S'}}{a + b}$
<i>Albedo</i>	$w = \frac{1}{\alpha} \frac{2r}{1 + r^2 - t^2} = \frac{2R}{1 + R^2 - T^2}$	$w = \frac{1}{a} \frac{S}{K + S} = \frac{2R}{1 + R^2 - T^2}$	$w = \frac{1}{\alpha} \frac{2\sqrt{rr'}}{1 + rr' - tt'} = \frac{2\sqrt{RR'}}{1 + RR' - TT'}$	$w = \frac{1}{a} \frac{2\sqrt{SS'}}{K + K' + S + S'} = \frac{2\sqrt{RR'}}{1 + RR' - TT'}$

exponentiel entre les valeurs de flux aux profondeurs discrètes. L'approche discrète a cependant un avantage conceptuel : elle exprime la propagation des flux en termes de *transferts* quand l'approche continue l'exprime en termes de *pertes* (absorption, réflexion-diffusion). Les flux transférés sont *a priori* directement mesurables alors que les pertes de flux ne peuvent l'être qu'indirectement.

En 2012 et 2014, nous avons étendu ces raisonnements à l'empilement d'éléments non-symétriques, c'est-à-dire dont les faces ont des facteurs de réflexion différents, généralisant encore le formulaire des modèles à deux flux sous ses formes discrète [15] et continue [8] (Table 1, colonnes 3 et 4). La version continue est une extension du modèle de Kubelka-Munk à des coefficients d'absorption et de diffusion différents pour les flux avant et arrière. Ceci paraît peu réaliste d'un point de vue radiométrique sauf peut-être dans le cas de milieux particuliers comme les cristaux liquides. Mais l'emploi de coefficients effectifs différents dans les deux sens de propagation peut s'avérer utile en pratique pour des milieux semi-diffusants éclairés par un flux collimaté, comme alternative simplifiée du modèle à quatre flux : le flux avant étant beaucoup plus directionnel que le flux arrière, leurs longueurs de transport ont de fortes chances d'être différentes. On peut ainsi espérer pouvoir étendre le champ d'application de l'approche à deux flux au-delà de ses limites attestées que sont les matériaux non-diffusants ou fortement diffusant, donc considérer des matériaux translucides semi-diffusants [31-32].

Notons que le paramètre α défini dans la Table 1 peut se calculer en fonction des facteurs de transfert d'un élément comme de plusieurs : il est invariant selon le nombre d'éléments superposés. Noté a dans le formalisme usuel de Kubelka-Munk, valant $(K+S)/S$, son inverse est appelé *albedo du milieu* [30], définie par :

$$w = \frac{2\rho}{1+\rho^2-\tau^2} \quad (10)$$

où ρ et τ sont les facteurs de réflexion, respectivement de transmission, de l'empilement choisi.

La notion d'albédo peut s'étendre à l'empilement d'éléments non symétriques et se calculer à partir des facteurs de réflexion et de transmission avant (ρ, τ) et arrière (ρ', τ') d'un nombre quelconque d'éléments superposés :

$$w = \frac{2\sqrt{\rho\rho'}}{1+\rho\rho'-\tau\tau'} \quad (11)$$

Dans les cas où l'approche à deux flux s'avère trop imprécise, on peut avoir recours à un modèle à n flux où la distribution angulaire de la lumière est prise en compte de manière plus détaillée. Le formalisme matriciel que nous avons évoqué pour deux flux s'étend grâce à un formalisme matriciel par bloc. Dans l'équation (8), les flux I_k et J_k deviennent des vecteurs correspondant aux intensités prises à des angles discrets. Chaque élément de la matrice de transfert devient lui-même une matrice dont les coefficients sont des facteurs de transfert bi-directionnels. Ce formalisme par bloc se décline aussi bien en version continue [10, 1] qu'en version discrète (modèle « *adding-doubling* ») [22-23], où il est possible de prendre en

compte la polarisation de la lumière [33]. Selon un principe similaire, le modèle dit « à quatre flux » considère en parallèle la propagation de deux flux collimatés et deux flux lambertiens, ainsi que la conversion de flux collimatés en flux lambertiens [34]. Un modèle de ce type appliqué au rendu de supports papier vient de paraître [35] et a été présenté comme « Highlighted Articles from OSA Journals » par le comité éditorial de l'Optical Society of America [voir 36].

3.4. Matrices de transfert pour les demi-tons

Les matrices de transfert sont *a priori* réservées à des éléments homogènes. Dans le cadre de la thèse de Serge Mazauric, nous sommes cependant parvenus à les étendre à des couches en demi-ton [8]. Cette extension n'est pas difficile mais elle est subtile, car selon que l'on considère la couche colorante comme un élément optique à part entière, ou qu'on l'associe à un élément voisin (interface, ou support) comme formant un élément unique, on obtient des formules différentes où l'engraissement optique des points d'encres n'est pas modélisé de la même manière.

L'approche la plus classique, celle choisie par Clapper et Yule, consiste à considérer la couche colorante et l'interface avec l'air comme élément unique, bordé par le substrat du support. Dans le cas des imprimés recto-verso, cette approche conduit au modèle que nous avons nommé « *Duplex Clapper-Yule model* » (DCY). Les transferts de flux correspondants sont illustrés dans la Figure 11-a, à travers l'exemple d'un imprimé recto-verso ayant deux primaires sur le recto (taux de couverture a_1 et a_2), et deux autres sur le verso (taux de couverture a'_1 et a'_2). La portion de flux J_1 ou I_2 issu du substrat du support et réfléchi par l'interface traverse deux fois la même primaire, caractérisée par son facteur spectral de transmission interne t_i . Notons que les flux « colorés » par les primaires se mélangent complètement dans le substrat du support.

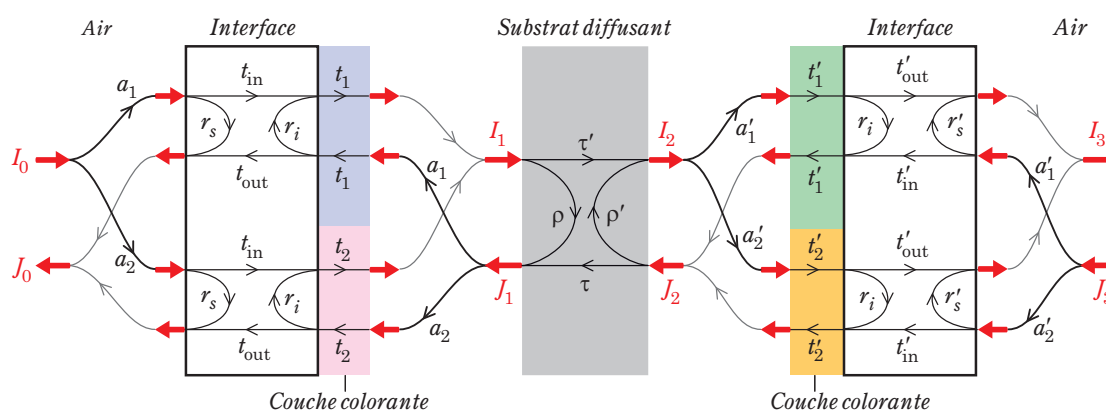


Fig. 11. Transferts de flux dans un imprimé recto-verso entre les interfaces + couches colorantes et le substrat diffusant du support, selon le modèle « Duplex Clapper-Yule » [8].

La matrice de transfert associée à la couche colorante du recto s'obtient par un produit de matrices rectangulaires dont la taille croît avec le nombre k de primaires. Les unes contiennent

les taux de couverture, les autres les facteurs transferts. La matrice s'écrit comme ci-dessous pour deux primaires, avec des matrices 2×3 et 3×2 , plus généralement $2 \times (k + 1)$ et $(k + 1) \times 2$:

$$\frac{1}{t_{in} \sum_k a_k t_k} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & a_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ t_{in} t_1 & r_s \\ t_{in} t_2 & r_s \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & t_{out} t_1 & t_{out} t_2 \\ 1 & -r_i t_1^2 & -r_i t_1^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ a_1 & 0 \\ a_2 & 0 \end{pmatrix}$$

La matrice associée à la couche colorante du verso s'exprime de manière similaire.

Une autre approche consiste à considérer les couches colorantes et le substrat comme formant un seul élément, ce qui constitue un ensemble de primaires recto-verso, appelées “*duplex primaries*”, correspondant au substrat encré des deux côtés, dont on exprime directement les facteurs de transfert globaux. Les transferts de flux sont décrits Figure 12. Ce modèle appelé *Duplex Primary Reflectance-Transmittance model* (DPRT) semble plus approprié lorsque la couche colorante pénètre dans le support et n'est donc plus assez translucide pour n'être caractérisée par son seul facteur de transmission. Contrairement au modèle DCY que l'on peut calibrer à partir d'imprimés recto simple (les 44 patches de couleur présentés dans la Figure 4, p. 28, à mesurer en réflexion et en transmission), le calibrage du modèle DPRT demande de mesurer les quatre facteurs de transfert de toutes les primaires recto-verso, dont le nombre est le carré du nombre de primaires présentes sur une face. Toutefois, si le support est symétrique et l'impression sur les deux faces se fait avec les mêmes encres et la même trame, on revient au même nombre de mesures qu'avec le modèle DCY.

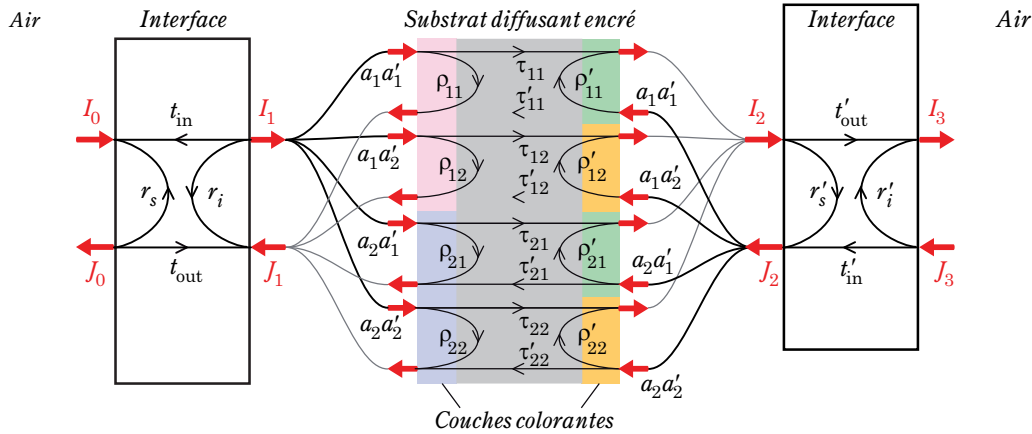


Fig. 12. Transferts de flux dans un imprimé recto-verso entre les interfaces et le substrat encré selon le modèle “Duplex Primary Reflectance-Transmittance” [8].

La matrice de transfert associée au substrat encré s'obtient par le produit matriciel suivant :

$$\frac{1}{\sum_{i,j} a_i a'_j \tau_{ij}} \mathbf{A} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ \tau_{11} & \tau_{12} & \rho_{11} & \rho_{12} \\ \tau_{21} & \tau_{22} & \rho_{21} & \rho_{22} \end{pmatrix} \cdot \mathbf{A}'^T \mathbf{A} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 0 & \tau'_{11} & \tau'_{12} \\ 0 & 0 & \tau'_{21} & \tau'_{22} \\ 1 & 1 & -\rho'_{11} & -\rho'_{12} \\ 1 & 1 & -\rho'_{21} & -\rho'_{22} \end{pmatrix} \cdot \mathbf{A}'^T$$

avec

$$\mathbf{A} = \left(\begin{array}{cc|cc} a_1 & a_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_1 & a_2 \end{array} \right), \quad \text{et} \quad \mathbf{A}' = \left(\begin{array}{cc|cc} a'_1 & a'_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a'_1 & a'_2 \end{array} \right).$$

La précision du modèle DPRT est là-encore inférieure à l'unité de CIELAB ΔE_{94} en moyenne pour les quatre facteurs de transfert sur les dizaines d'échantillons testés.

3.5. Paramètres calculés en réflexion ou en transmission

Dans la plupart des expériences où nous avons cherché à prédire le facteur de réflexion et de transmission de supports imprimés [37-39], nous avons constaté – sans grande surprise – que les paramètres relatifs aux primaires, c'est-à-dire leurs facteurs internes de transmission et leurs taux de couverture, prennent des valeurs différentes selon qu'on les déduit de mesures en transmission (en utilisant la formule du facteur de transmission associée), ou de mesures en réflexion (en utilisant la formule du facteur de réflexion). On obtient ainsi des prédictions correctes en réflexion mais pas en transmission, ou réciproquement. Cela pose problème lorsqu'on cherche à prédire les deux facteurs à la fois : quand l'imprimé est en superposition avec d'autres éléments, le modèle doit prendre en compte les flux qu'il réfléchit aussi bien que les flux qui le traversent.

Pendant la thèse de Jacques Machizaud, nous avons été confrontés à ce problème lorsque nous cherchions à prédire la couleur d'un film imprimé posé sur un papier imprimé [39] : pour un même demi-ton, nous avons dû affecter à chaque primaire deux taux de couverture et deux facteurs spectraux de transmission interne, les uns servant à prédire les facteurs de réflexion, les autres à prédire les facteurs de transmission. Cet artifice empirique n'est pas absurde dans la mesure où le modèle est lui-même empirique, mais il n'est pas satisfaisant non plus. Le modèle DPRT développé avec Serge Mazauric résout ce problème, d'une part en supprimant le concept de facteur de transmission interne pour les primaires, lequel est incorporé dans les facteurs de transfert du substrat encré, et d'autre part en déduisant les taux de couvertures des primaires non plus d'un facteur spectral de réflexion ou de transmission, mais des deux à la fois grâce aux matrices de transfert : l'équation de minimisation pour les obtenir porte sur une distance matricielle entre la matrice de transfert issue des mesures et celle formulée par le modèle [8]. Nous avons récemment montré que la minimisation peut aussi porter sur une albédo effective calculée selon l'équation (11), plus simple à calculer que la distance matricielle. Les performances prédictives sont légèrement dégradées par rapport à la méthode où la prédiction et le calibrage se font dans un seul et même mode : la valeur moyenne du CIELAB ΔE_{94} augmente d'environ 0,1 unité. Mais nous pouvons désormais prédire simultanément les facteurs de réflexion et de transmission avec les mêmes valeurs de paramètres, et avec des performances prédictives qui restent tout à fait acceptables : la valeur moyenne de ΔE_{94} est inférieure à l'unité pour la majorité des échantillons testés.

3.6. Effets de bronzage

Certaines encres très absorbantes imprimées sur un support imperméable présentent un reflet coloré dans la direction spéculaire, dont la teinte est souvent très différente de celle de l'encre elle-même. Ce phénomène de « bronzage » est particulièrement notable sur certains tirages

photographiques en jet d'encre sur papier couché. Bien connu des photographes, ce phénomène n'a pourtant été l'objet d'aucune étude physique publiée avant la nôtre en 2015 [40]. Il vient de la forte absorption de la lumière par l'encre, qui induit une augmentation du facteur de réflexion de l'interface air-encre dans la bande spectrale d'absorption, ce que les formules de Fresnel permettent facilement de prédire à partir de l'indice spectral complexe de l'encre. La Figure 13-a montre un exemple d'aplat d'encre cyan Canon présentant un reflet rougeâtre, qui disparaît si on recouvre la surface d'un film transparent, ici un ruban adhésif. Ceci confirme que l'effet est produit par l'interface air-encre. Les facteurs de réflexion mesurés dans la direction spéculaire (incidence à 45° , observation à 45°) et en dehors (incidence à 45° , observation à 30°), affichés dans la Figure 13-b, montrent que l'écart dû à la composante de réflexion spéculaire concerne principalement les longueurs d'onde supérieures à 500 nm, ce qui concorde avec la couleur de reflet observée.

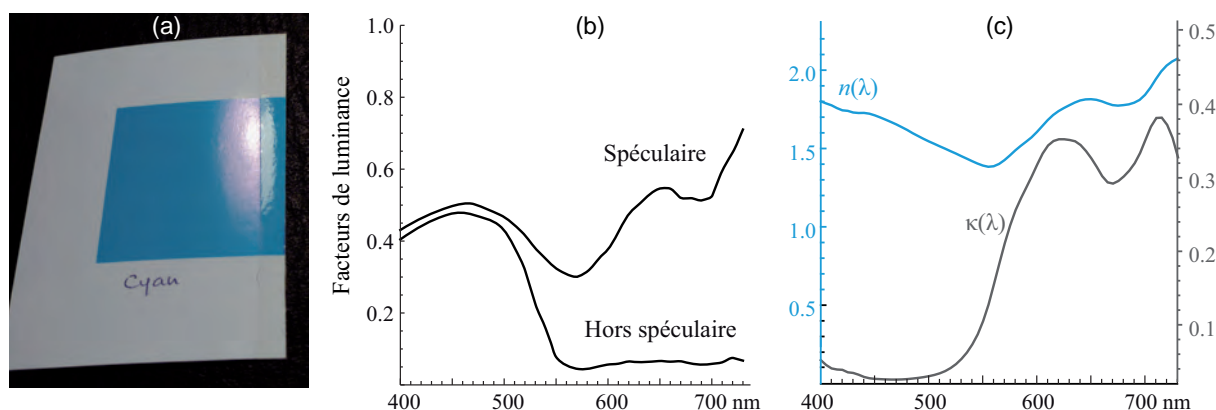


Fig. 13. (a) Aplat d'encre cyan imprimé sur papier couché, présentant un effet de bronzage rougeâtre, alors que le reflet sur la zone couverte par un ruban adhésif, à droite de l'image, n'est pas coloré. (b) facteurs de luminance mesurés sur cet échantillon dans la direction spéculaire ($45^\circ:45^\circ$) et en dehors ($45^\circ:30^\circ$). (c) Parties réelle n et imaginaire κ de l'indice complexe spectral de l'encre.

La formulation d'encres fortement absorbantes sert à augmenter la chroma des primaires, donc à élargir la gamme de reproduction des couleurs. Si les fabricants d'encres s'accordent pour considérer le bronzage comme un phénomène gênant, certains comme HP préfèrent l'éviter en formulant des encres moins absorbantes, d'autres, dont Canon, préfèrent conserver une gamme étendue de couleurs. Le bronzage n'induit pas seulement un artefact visuel sur les images imprimées mais peut aussi introduire des erreurs dans le calibrage des modèles lorsque ceux-ci n'en tiennent pas compte : les paramètres ajustés sont erronés et peuvent générer des prédictions médiocres, surtout en impression multi-encres [41].

L'indice complexe des encres est rarement connu et souvent délicat à déterminer surtout lorsque la couche est très absorbante ou lorsqu'elle est diffusante [42]. Dans notre étude où l'encre pour jet d'encre est peu diffusante, nous avons estimé son indice spectral complexe en imprimant un aplat sur film transparent, dont on mesure les facteurs de transfert à incidence normale sur les deux faces. Le modèle à transfert de flux, adapté à la structure optique du film imprimé { interface air-encre / couche d'encre (supposée non mince) / interface encre-film /

couche de polymère transparent / interface film-air } permet d'obtenir les équations associées à ces facteurs de transfert mesurés, qui ne dépendent que de l'indice complexe de l'encre, de l'indice réel du film et du facteur de transmission interne de celui-ci. La Figure 13-c montre l'indice spectral complexe obtenu pour l'encre cyan étudiée.

Pour prédire le facteur spectral de luminance dans la direction spéculaire, on peut reprendre le modèle Clapper-Yule, donné par l'équation (7), p. 33, en calculant le facteur de réflexion r_s de l'interface air-encre à partir de son indice relatif complexe, au lieu d'un indice réel 1.5 comme le suggère le modèle classique. Lorsque l'éclairage est parfaitement diffus, l'effet de bronzage est peu prononcé puisque le flux spéculairement réfléchi est faible comparativement au flux diffus vu par l'observateur. Le facteur de luminance prédit est en bon accord avec celui mesuré (voir Figure 14-a) : l'écart colorimétrique ΔE_{94} correspondant est de 0.7 unité.

En revanche la prédiction est plus difficile lorsque l'éclairage est collimaté : l'effet de bronzage est beaucoup plus marqué, et un effet de diffusion cohérente dû à la nano-rugosité de l'interface air-encre atténue le flux réfléchi dirigé dans la direction spéculaire dans les courtes longueurs d'onde du spectre visible. Pour modéliser cette diffusion, un modèle

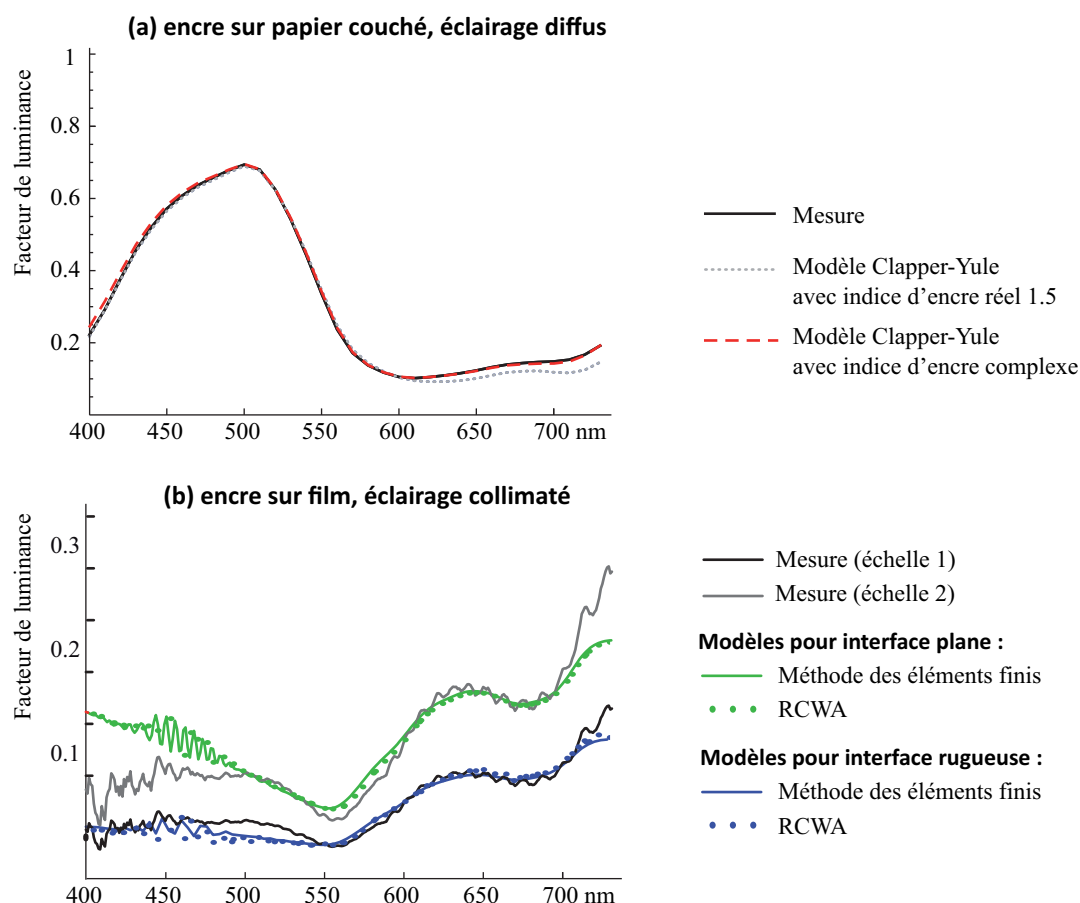


Fig. 14. (a) Facteurs de luminance mesuré et prédit d'un aplat d'encre cyan sur papier sous éclairage diffus avec composante spéculaire incluse (géométrie de mesure $d:8^\circ$) ; (b) facteurs de luminances mesurés et prédits du même aplat d'encre sur film transparent sous éclairage collimaté (géométrie de mesure $45^\circ:45^\circ$), où l'échelle du spectre mesuré, dépendant de l'ouverture numérique du détecteur, est ajusté aux spectres prédits.

électromagnétique a été établi en collaboration avec le laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique – Palaiseau, à partir des indices complexes précédemment déduits et d'une mesure topographique de l'interface air-encre par AFM. Deux méthodes ont été testées pour un aplat d'encre imprimé sur film : la méthode des éléments finis [43] et la méthode par analyse rigoureuse d'ondes couplées (rigorous coupled-wave analysis method, RCWA) étendue à des profils de rugosités non binaires et non périodiques [44-45]. Les deux méthodes donnent des résultats très similaires. Si on omet la rugosité dans ces modèles, prédictions et mesures dévient dans les courtes longueurs d'onde, alors que cette déviation s'atténue si on prend en compte la rugosité (Figure 14-*b*).

L'étude du bronzage doit être poursuivie en analysant d'éventuels effets d'interférence dus à l'épaisseur de la couche d'encre (de l'ordre du micron à la dizaine de microns) et en étendant les modèles aux primaires à plusieurs encres, le bronzage dépendant fortement de l'ordre de superposition des encres.

3.7. Extension du modèle aux couches minces

Dans une étude préliminaire en collaboration avec l'Institut P' à Poitiers, nous avons cherché à voir si le modèle à deux flux généralisé permet de prédire le facteur de luminance d'un système multicouche comprenant une couche fortement diffusante, une couche non-diffusante épaisse et une couche mince [46]. L'étude a porté sur des dépôts de silicium par pulvérisation magnétron de 10.8 nm et 4.8 nm d'épaisseur sur une lame de verre de 150 μm d'épaisseur, placée en contact optique avec un fond blanc diffusant. Les indices du silicium et du verre ont été mesurés par ellipsométrie, et le facteur de réflexion du fond blanc, supposé lambertien, par un spectromètre en géométrie $45^\circ:0^\circ$ (éclairage directionnel à 45° , observation selon la normale de l'échantillon).

Le modèle utilise les matrices d'Abelès pour prédire les amplitudes complexes du champ électrique des ondes réfléchies et transmises par chaque couche mince sur ses deux faces, en fonction de l'angle d'incidence. Celles-ci sont converties via le vecteur de Pointing en facteurs de réflexion et de transmission angulaires en supposant des flux incidents parfaitement incohérents. On calcule ensuite avec le modèle à transfert de flux les facteurs de transfert angulaires du système {couche mince + lame de verre}, puis les facteurs de transferts pour un éclairage diffus provenant du fond diffusant et de l'air. On calcule enfin le facteur de luminance du système complet pour une géométrie de mesure $45^\circ:0^\circ$.

Les facteurs spectraux de réflexion et de transmission de la lame de verre avec la couche mince, ainsi que le facteur de luminance de la lame sur fond diffusant, sont montrés dans la Figure 15. L'imprécision de la prédiction du facteur de transmission de la lame se répercute sur celle du facteur de luminance de la lame avec fond blanc, dont la déviation avec la mesure n'est pas satisfaisante du point de vue colorimétrique. Cependant, étant donné qu'aucun paramètre n'a été ajusté dans ce modèle (notamment l'épaisseur des couches minces), ces premiers résultats nous confortent dans l'idée que le modèle à deux flux peut être généralisé à des systèmes incorporant des couches minces.

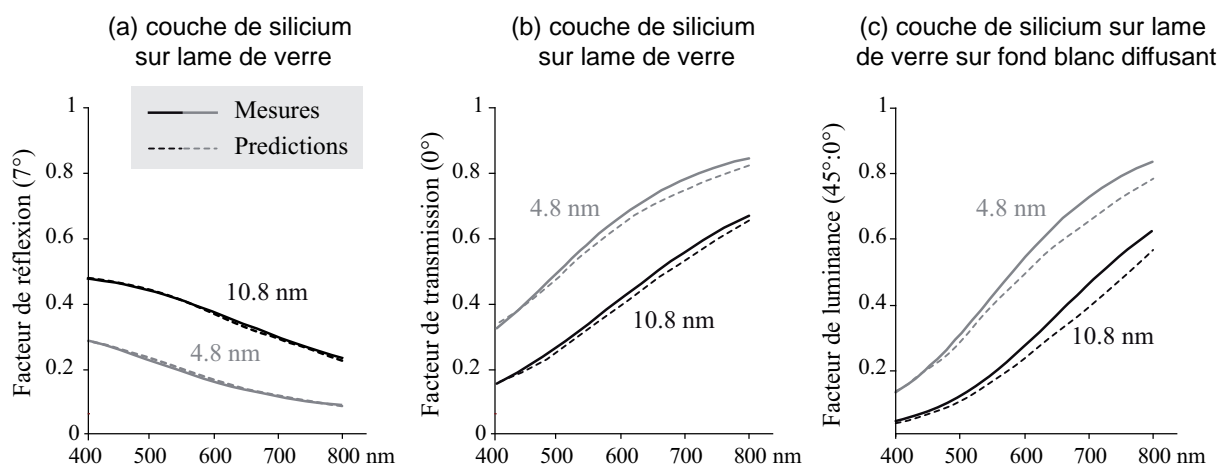


Fig. 15. Facteurs (a) de réflexion et (b) de transmission mesurés et prédits de couches minces de silicium de 4.8 et 10.8 nm d'épaisseur déposées sur lame de verre, et (c) facteurs de luminance mesurés et prédits de ces lames déposées sur fond blanc diffusant.

3.8. Conclusion

Le modèle à transferts de flux, selon l'approche à deux flux généralisée, permet de prédire de manière simple les facteurs de réflexion, de transmission ou de luminance de surfaces planes multicouches, avec une bonne précision concernant les imprimés en demi-tons sur papier ou sur films et les empilements de supports colorés. Le modèle Kubelka-Munk étendu aux milieux uniformément stratifiés pourrait s'avérer utile pour les empilements de couches en demi-tons dans l'impression en volume (impression 2,5D et 3D). Des expériences en ce sens sont déjà prévues. La prise en compte de l'indice complexe des encres, inhabituelle dans le domaine de la reproduction des couleurs, permet d'expliquer le phénomène de bronzage et de l'intégrer dans les modèles pour surfaces imprimées. Les conséquences du bronzage sur leur précision méritent d'être étudiées pour améliorer leurs performances dans le cas de l'impression multi-encres, quitte à devoir recourir aux modèles électromagnétiques de diffusion dans le cas où des effets de cohérence se manifestent. L'extension aux surfaces incluant des couches minces reste à vérifier avec des expériences plus poussées, mais elle paraît à ce stade prometteuse.

Après la présentation de ces modèles directs, nous proposons à présent de passer aux problématiques inverses pour designer des effets visuels à partir de configurations ou techniques d'impression innovantes.

3.9. Références

1. M. Hébert, P. Emmel, "Two-flux and multiframe matrix models for colored surfaces," in *Handbook of Digital Imaging*, Vol. 2, Ed. Mickael Kriss, Wiley, pp. 1233–1277 (2015).
2. F. Abelès, "La théorie générale des couches minces," *Le Journal de Physique et le Radium* **11**, 307–310 (1950).
3. E. Centurioni, "Generalized matrix method for calculation of internal light energy flux in mixed coherent and incoherent multilayers," *Applied Optics* **44**, 7532–7539 (2005).

4. M. C. Troparevsky, A. S. Sabau, A. R. Lupini, Z. Zhang, "Transfer-matrix formalism for the calculation of optical response in multilayer systems: from coherent to incoherent interference," *Opt. Express* **18**, 24715–24721 (2010).
5. C. L. Mitsas, D. I. Siapkas, "Generalized matrix method for analysis of coherent and incoherent reflectance and transmittance of multilayer structures with rough surfaces, interfaces, and finite substrates," *Appl. Opt.* **34**, 1678–1683 (1995).
6. C. C. Katsidis, D. I. Siapkas, "General Transfer-Matrix Method for Optical Multilayer Systems with Coherent, Partially Coherent, and Incoherent Interference," *Appl. Opt.* **41**, 3978–3987 (2002).
7. A. Wolf, B. Terheiden, R. Brendel, "Light scattering and diffuse light propagation in sintered porous silicon," *J. Appl. Phys.* **104**, Paper 033106 (2008).
8. S. Mazauric, M. Hébert, L. Simonot, T. Fournel, "2-flux transfer matrix model for predicting the reflectance and transmittance of duplex halftone prints," *J. Opt. Soc. Am. A* **31**, 2775–2788 (2014).
9. P. Emmel, R. D. Hersch, "A 'one channel' Spectral Colour Prediction Model for Transparent Fluorescent Inks on a Transparent Support," *Proc. IS&T/SID 5th Color Imaging Conference*, 70–77 (1997).
10. P. Emmel, *Modèles de prédiction couleur appliqués à l'impression jet d'encre*, Thèse de doctorat, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (1998).
11. M. Hébert, R.D. Hersch, L. Simonot, "Spectral prediction model for piles of nonscattering sheets," *J. Opt. Soc. Am. A* **25**, 2066–2077 (2008).
12. P. Kubelka, "New contributions to the optics of intensely light-scattering materials, part II: Non homogeneous layers," *J. Opt. Soc. Am.* **44**, 330–335 (1954).
13. M. Elias, L. Simonot, "Separation between the different fluxes scattered by art glazes: Explanation of the special color saturation," *Appl. Opt.* **45**, 3163–3172 (2006).
14. L. Simonot, *Étude expérimentale et modélisation de la diffusion de la lumière dans une couche de peinture colorée et translucide : application à l'effet visuel des glacis et des vernis*, Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie – Paris VI (2002).
15. M. Hébert, J. Machizaud, "Spectral reflectance and transmittance of stacks of nonscattering films printed with halftone colors," *J. Opt. Soc. Am. A* **29**, 2498–2508 (2012).
16. J. Machizaud, M. Hébert, "Spectral transmittance model for stacks of transparencies printed with halftone colors," *Proc. SPIE* **8292**, Paper 829240 (2012).
17. P. Kubelka, "New contributions to the optics of intensely light-scattering material, part I," *J. Opt. Soc. Am.* **38**, 448–457 (1948).
18. M. Hébert, J.-M. Becker, "Correspondence Between Continuous and Discrete 2-Flux Models for Reflectance and Transmittance of Diffusing Layers," *J. Opt. A* **10**, Paper 035006 (2008).
19. G. Stokes, "On the intensity of light reflected from or transmitted through a pile of plates," in *Mathematical and Physical Papers of Sir George Stokes, IV*. Cambridge University Press, 145–156 (1904).
20. G. Kortüm, *Reflectance Spectroscopy*, Springer Verlag (1969).
21. Z. Bodo, "Some optical properties of luminescent powders," *Acta Phys. Acad. Sci. Hungarica* **1**, 135–150 (1951).
22. H. C. van de Hulst, *Light scattering by small particles*, Dover Publications, pp. 200–227 (1981).
23. S. A. Prahl, *Light transport in tissues*, PhD dissertation, University of Texas (2008).
24. N. T. Melamed, "Optical properties of powders: Part I. Optical absorption coefficients and the absolute value of the diffuse reflectance," *J. Appl. Phys.* **34**, 560–570 (1963).
25. A. Mandelis, F. Boroumand, H. van den Bergh, "Quantitative diffuse reflectance spectroscopy of large powders: the Melamed model revisited," *Appl. Opt.* **29**, 2853–2860 (1990).
26. H. Garay, O. Eterradosi, A. Benhassaine, "Should Melamed's spherical model of size-colour dependence in powders be adapted to non spheric particles ?" *Powder Technology* **156**, 8–18 (2005).
27. Y.G. Shkuratov, L. Starukhina, H. Hoffmann, G. Arnold, "A model of spectral albedo of particulate surfaces: implication to optical properties of the Moon," *Icarus* **137**, 235–246 (1999).
28. Y.G. Shkuratov, Y.S. Grynko, "Light scattering by media composed of semitransparent particles of different shapes in ray optics approximation: consequences for spectroscopy, photometry, and polarimetry of planetary regoliths," *Icarus* **173**, 16–28 (2005).
29. L. Simonot, M. Hébert, R. D. Hersch, H. Garay, "Ray scattering model for spherical transparent particles," *J. Opt. Soc. Am. A* **25**, 1521–1534 (2008).

30. S. E. Orchard, "Reflection and Transmission of Light by Diffusing Suspensions," *J. Opt. Soc. Am.* **59**, 1584–1597 (1969).
31. W. E. Vargas, G. A. Niklasson, "Applicability conditions of the Kubelka-Munk theory," *Appl. Opt.* **36**, 5580–5586 (1997).
32. R.D. Hersch, M. Hébert, "Base models for color halftone reproduction," in *Handbook of Digital Imaging*, Vol. 2, Ed. Mickael Kriss, Wiley, pp. 1079–1132 (2015).
33. C. Bordier, C. Andraud, J. Lafait, "Model of light scattering that includes polarization effects by multilayered media," *J. Opt. Soc. Am. A* **25**, 1406–1419 (2008).
34. C. Rozé, T. Girasole, A.G. Tafforin, "Multilayer four-flux model of scattering, emitting and absorbing media," *Opt. Commun.* **194** (2001) 251–263.
35. L. Simonot, R.D. Hersch, M. Hébert, S. Mazauric, T. Fournel, "Multilayer four-flux matrix model accounting for directional-diffuse light transfers," *Appl. Opt.* **55**, 27–37 (2016).
36. See <https://www.osapublishing.org/spotlight/summary.cfm?id=333808>
37. M. Hébert, R. D. Hersch, "Reflectance and transmittance model for recto-verso halftone prints: spectral predictions with multi-ink halftones," *J. Opt. Soc. Am. A* **26**, 356–364 (2009).
38. M. Hébert, "Yule-Nielsen effect in halftone prints: graphical analysis method and improvement of the Yule-Nielsen transform," *Proc. SPIE* **9015**, Paper 90150R (2014).
39. J. Machizaud, M. Hébert, "Spectral reflectance and transmittance prediction model for stacked transparency and paper both printed with halftone colors," *J. Opt. Soc. Am. A* **29**, 1537–1548 (2012).
40. M. Hébert, M. Mallet, A. Deboos, P. Chavel, D.-F. Kuang, J.-P. Hugonin, M. Besbes, A. Cazier, "Exploring the bronzing effect at the surface of ink layers," *Proc. SPIE* **9398**, Paper 9398-30 (2015).
41. R. Slavuj, L. G. Coppel, M. Olen, J. Y. Hardeberg, "Estimating Neugebauer primaries for multi-channel spectral printing modeling," *Proc. SPIE* **9018**, Paper 9018-11 (2014).
42. R. Jarrige, *Détermination des propriétés optiques de matériaux granulaires*, Thèse de doctorat à l'Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2012.
43. J.-P. Hugonin, M. Besbes, P. Lalanne, "Hybridization of electromagnetic numerical methods through the G-matrix algorithm," *Opt. Lett.* **33**, 1590–1592 (2008).
44. J.-P. Hugonin, P. Lalanne, "Perfectly matched layers as nonlinear coordinate transforms: a generalized formalization," *J. Opt. Soc. Am. A* **22**, 1844–1849 (2005).
45. M. G. Moharam, T. K. Gaylord, E. B. Grann, D. A. Pommet, "Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings," *J. Opt. Soc. Am. A* **12**, 1068–1076 (1995).
46. M. Hébert, L. Simonot, S. Mazauric, "Matrix method to predict the spectral reflectance of stratified surfaces including thick layers and thin films" Rapport de recherche, Université de Poitiers, Université Jean Monnet de Saint-Etienne, CPE-Lyon, Mai 2015. <hal-01155614v1>.

Chapitre 4.

Gestion des couleurs et nouvelles configurations d'impression

Les modèles présentés précédemment servent à prédire le facteur spectral de réflexion ou de transmission de supports à partir de paramètres d'impression donnés. Ils permettent de calculer la gamme de couleurs reproductibles, ou *gamut*, dans chaque mode d'observation et pour chaque densité spectrale d'éclairage. Mais leur réel intérêt réside dans leur capacité à traiter le problème inverse, c'est-à-dire calculer les quantités d'encre à déposer pour obtenir une couleur cible sous un éclairage donné, moyennant un minimum de mesures préalables. L'étape de conversion d'une couleur cible, généralement définie par ses coordonnées dans l'espace colorimétrique CIE-LAB, en quantités d'encre primaires à déposer est appelée la *séparation des couleurs* (Figure 16). Si la couleur cible se trouve en dehors du gamut, un module de correspondance des couleurs (*gamut mapping*) convertit la couleur cible initiale en couleur cible reproductible [1]. L'inversion du modèle prédictif permet de calculer les quantités d'encre donnant le facteur spectral de réflexion associé à la couleur cible.

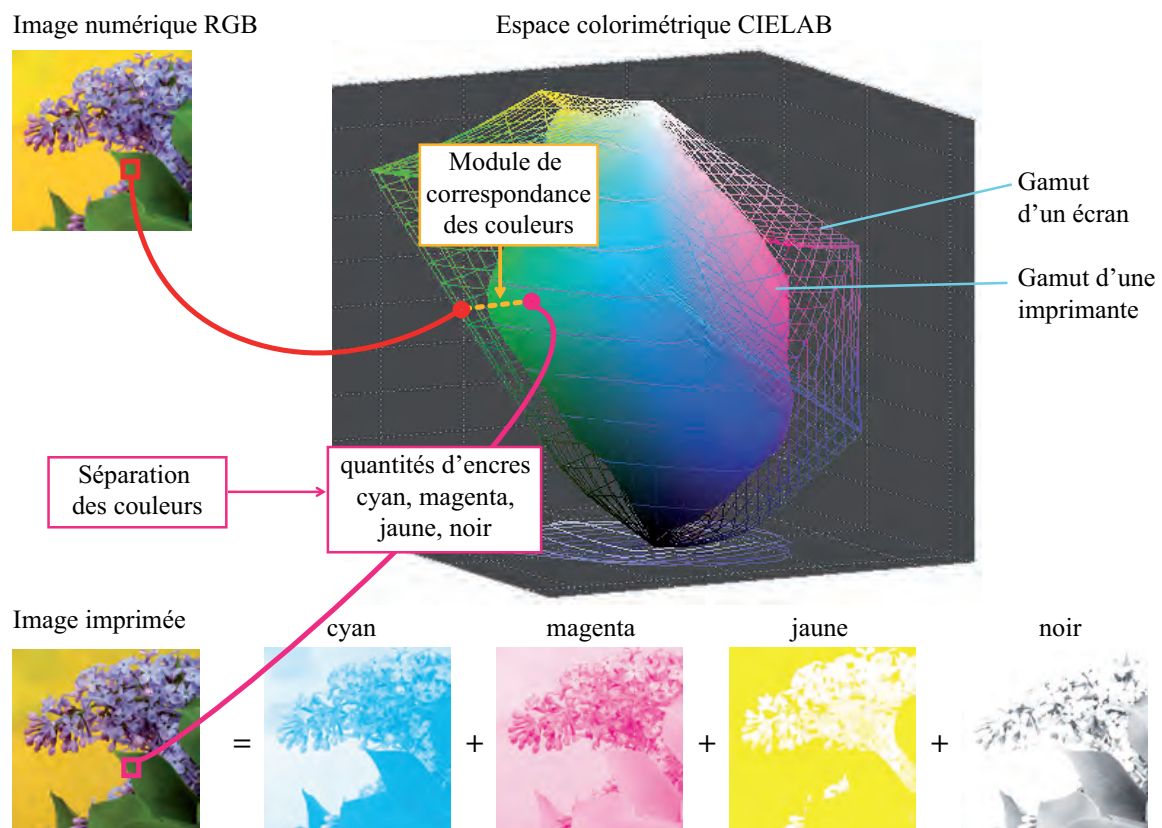


Fig. 16. Principales étapes de conversion d'une image numérique en image imprimée ([2], p.81).

En impression à trois encres, la correspondance entre couleur et quantités d’encres est bijective. Cela vaut aussi bien pour les encres usuelles cyan, magenta et jaune que pour d’autres couleurs d’encres [3,4]. En revanche, la correspondance n’est plus bijective à partir de quatre encres : en impression cyan-magenta-jaune-noir (CMYK) par exemple, les gris peuvent être reproduits aussi bien par de l’encre noire seule que par les encres chromatiques seules ou un mélange des quatre. La quantité d’encre noire à appliquer est calculée par un algorithme de gestion du noir (*under color removal*), selon des critères propres à chaque système : on privilégie l’encre noire pour réduire le taux d’encrage et éviter de trop mouiller le support, ou au contraire les encres chromatiques pour obtenir des textures de demi-tons moins visibles ou favoriser la vente de consommables. L’algorithme se complexifie avec l’impression multi-encres [5-6], même si en général l’augmentation du nombre d’encres vise à reproduire non plus des couleurs mais des facteurs spectraux de réflexion, auquel cas le problème est plus contraint [7-8]. On parle alors de module de correspondance spectrale (*spectral gamut mapping*) [9]. L’intérêt de l’impression dite « spectrale » est de limiter les problèmes de métamérisme lorsque la surface imprimée s’intègre dans un objet multi-matière où tous les composants doivent avoir la même couleur sous différentes densités spectrales d’éclairage.

Pour les configurations d’impression que nous allons voir dans ce chapitre, les méthodes existantes de gestions des couleurs doivent être revisitées. Dans le cas des piles d’imprimés et des imprimés recto-verso, les encres ne sont plus imprimées sur une surface, mais à plusieurs niveaux dans un système multicouche. Dans le cas des systèmes d’impression sans encre que nous présenterons dans les sections 4.3 et 4.4, de nouvelles méthodes ont dû être recherchées pour établir la correspondance entre couleur et paramètres d’impression.

4.1. Images « multi-vues » obtenues par impression

Dans le cas spécifique des imprimés recto-verso et des imprimés empilés, le problème inverse peut avoir plusieurs solutions, ou aucune. Par exemple, pour produire une pile de films ayant une certaine couleur grise en transmission, on peut colorer les films de différentes manières. On peut jouer sur ces différentes combinaisons pour qu’un des films présente une première image, et la pile de films présente une deuxième image – dans la mesure où les couleurs des deux images en chaque pixel sont compatibles car on aura du mal à produire une pile de couleur grise si un des films est coloré en noir... Le même principe s’applique à l’impression recto-verso : une face observée en réflexion peut afficher une image tandis que l’imprimé vu en transmission peut en afficher une autre. Ces configurations d’impression « multi-vues » renforcent l’intérêt de la modélisation optique, car celle-ci permet de gérer les couleurs dans les différents modes de vue à partir d’un nombre très limité de mesures, alors que les méthodes numériques utilisées dans l’industrie en demanderaient un nombre bien trop élevé : Le nombre de mesures à réaliser pour chaque échantillon croît avec le nombre de vues possibles, et le nombre d’échantillons à produire croît exponentiellement avec le nombre de combinaisons de couleurs superposées.

Le concept d’image imprimée “multi-vues” est bien connu grâce à l’imagerie lenticulaire [10]. Le Laboratoire de Systèmes Périphériques (LSP) de l’EPFL a développé d’autres

techniques, basées sur la combinaison d'encre classiques et fluorescentes (visibles) pour faire varier l'image selon la teneur en UV de l'éclairage [11], ou par l'usage d'encre métalliques permettant de révéler dans la direction spéculaire des motifs invisibles dans les autres directions [12]. Par rapport à ces techniques existantes, les techniques fondées sur la superposition d'images ont pour avantage de ne pas nécessiter d'entrelacement contrairement à l'imagerie lenticulaire, ni d'encre spéciales.

La Figure 17 montre un exemple d'ajustement des couleurs réalisé par impression jet d'encre recto-verso sur papier calendré. Quatre couleurs sont ciblées en mode transmission, correspondant chacune à une ligne. Chaque couleur cible est d'abord produite par impression recto simple : cette couleur initiale est imprimée dans un rectangle sur deux. Les couleurs des autres rectangles sont choisies au hasard sur le recto, en veillant toujours à ce que les quantités d'encre ne dépassent pas celle de la couleur à reproduire. Celles du verso sont calculées à l'aide du modèle pour imprimés recto-verso de manière à minimiser l'écart colorimétrique couleurs des rectangles recto-verso et recto simple, perçues en transmission. Le décalage vertical entre le recto et le verso permet de visualiser les couleurs de chaque face dans l'image vue en mode transmission (Figure 17.c).

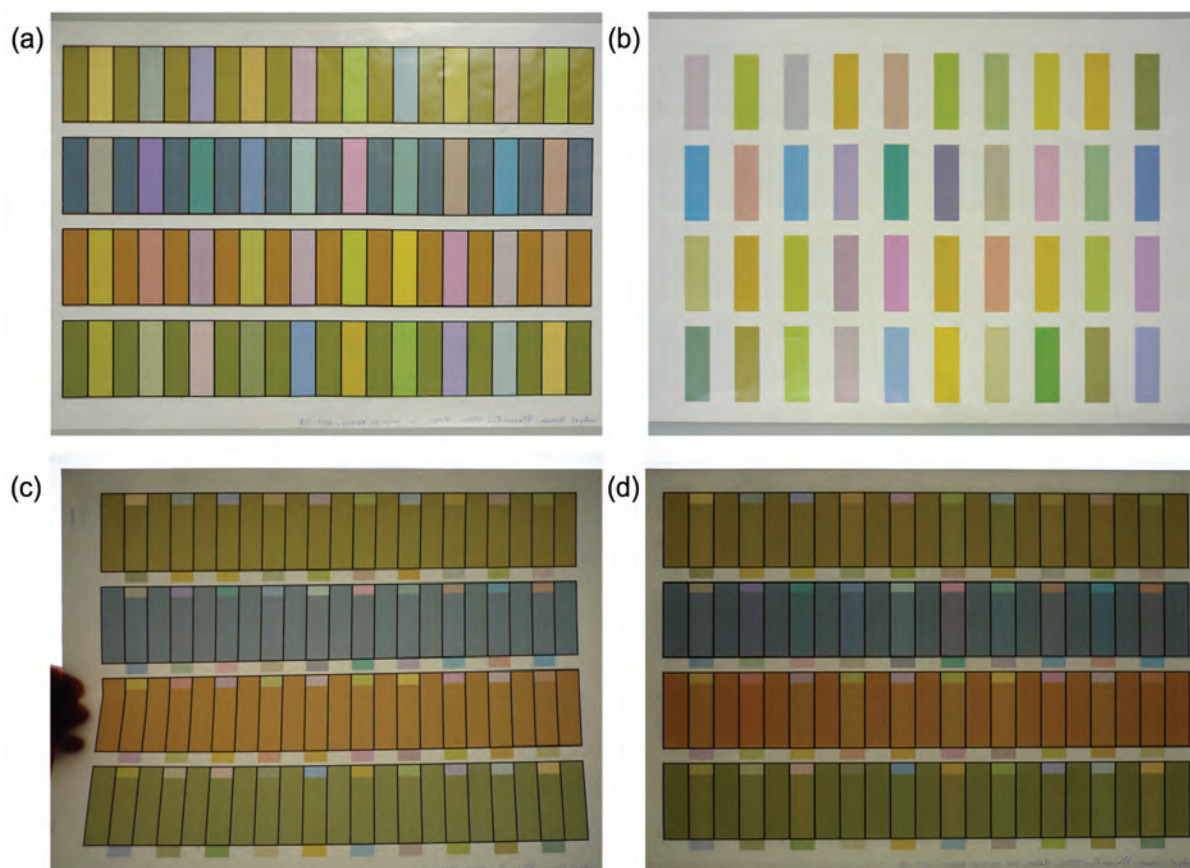


Fig. 17. Imprimé recto-verso produit par jet d'encre sur papier calendré (21 × 30 cm).

(a) Face recto et (b) face verso vues en mode réflexion ; imprimé vu en mode transmission devant une table lumineuse (c) à 5 cm de la table ou (d) contre la table.

L'ajustement des couleurs est quasiment parfait pour les teintes jaune, orange et verte. De légères variations apparaissent pour la teinte bleue, probablement à cause de la différence entre le spectre théorique de l'illuminant standard D65 utilisé dans les calculs colorimétriques et la densité spectrale réelle de la table lumineuse. On peut noter que l'effet d'ajustement des couleurs est sensible – ce qui est une qualité pour l'authentification visuelle de documents : il suffit de plaquer l'imprimé contre la table lumineuse pour que l'ajustement des couleurs soit fortement dégradé, simplement à cause des réflexions multiples de la lumière entre l'imprimé et la vitre de la table. Le modèle n'est pas prévu pour en tenir compte (Figure 17-*d*).

La Figure 18 montre un autre spécimen réalisé en juillet 2015 dans le cadre de la thèse de Serge Mazauric en partenariat avec Arjowiggins Security. Il affiche des motifs différents selon qu'on regarde la face avant en réflexion (éclairage par l'avant) ou en transmission (éclairage par l'arrière). Les images vues en réflexion, aux extrémités de la figure, sont formées de triangles unis de 3,3 mm de côté. L'image en transmission, au centre de la figure, affiche des triangles unis de 6,6 mm de côté correspondant à la juxtaposition de quatre triangles dans lesquels les taux de couverture d'encres sur le recto et le verso ont été calculés de manière à donner le même facteur spectral de transmission. L'ajustement spectral est plus intéressant que l'ajustement de la couleur car il est indépendant de l'illuminant. Ainsi, l'apparence unie des triangles en transmission a pu être observée aussi bien à la lumière du jour que sous une lampe fluorescente ou sous une torche à LED. Ce spécimen nécessite de se trouver dans une salle noire pour assurer que le mode d'éclairage-observation corresponde bien au mode transmission, sans éclairage sur la face recto. Des expériences sont en cours pour créer un effet similaire en double mode réflexion-transmission, où le spécimen est éclairé des deux côtés avec des éclairages spectraux connus.

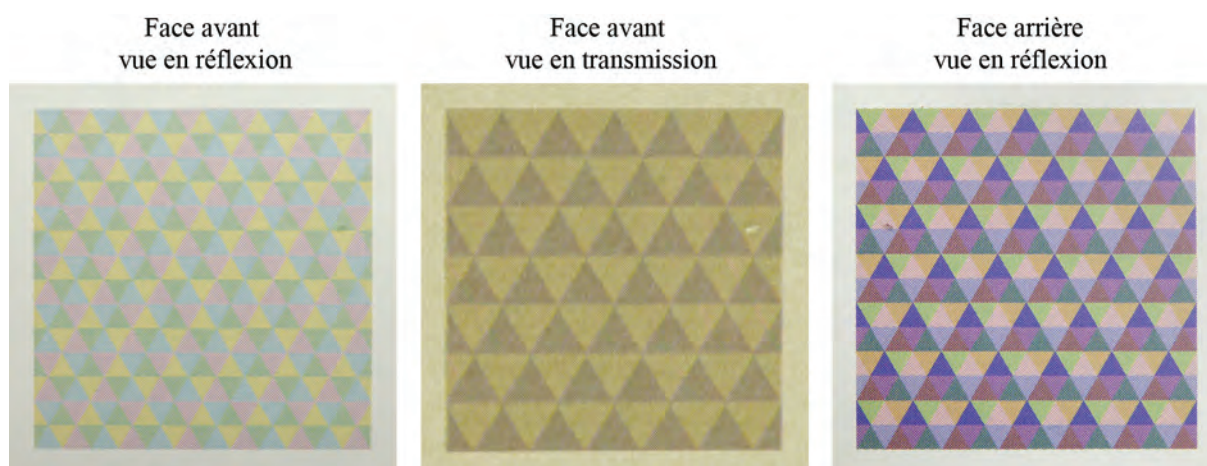


Fig. 18. Imprimé recto-verso produit par jet d'encre sur papier calendré (5 × 5 cm).

Le spécimen présenté Figure 19 a été réalisé plus tôt, en 2011, dans le cadre d'un projet d'étudiant de l'Institut d'Optique. Il est basé sur le même principe mais possède en outre une fonctionnalité stéganographique : en mode réflexion, la face avant présente une texture en damier et un mot, lesquels disparaissent en mode transmission pour faire apparaître un autre mot sur un fond uniforme.

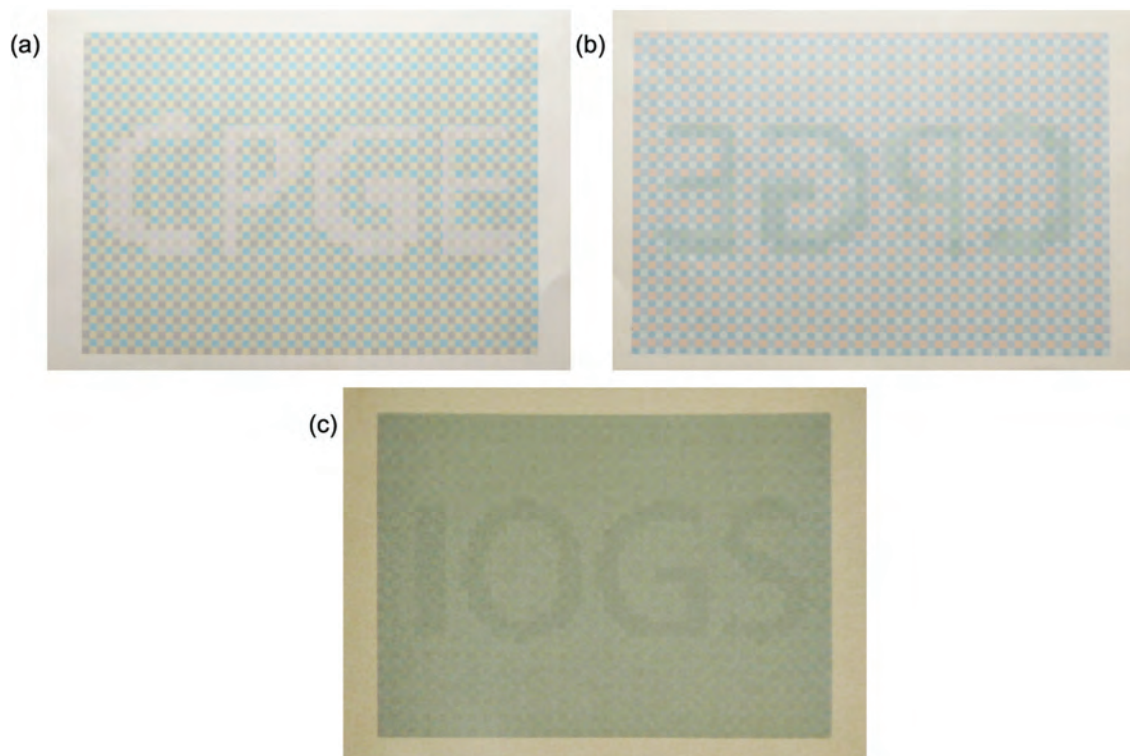


Fig. 19. Imprimé recto-verso produit par jet d'encre sur papier calendré (20×15 cm). (a) Face avant et (b) face arrière vues en mode réflexion (éclairage du côté de l'observateur) ; (c) imprimé vu en mode transmission (placé devant une table lumineuse).

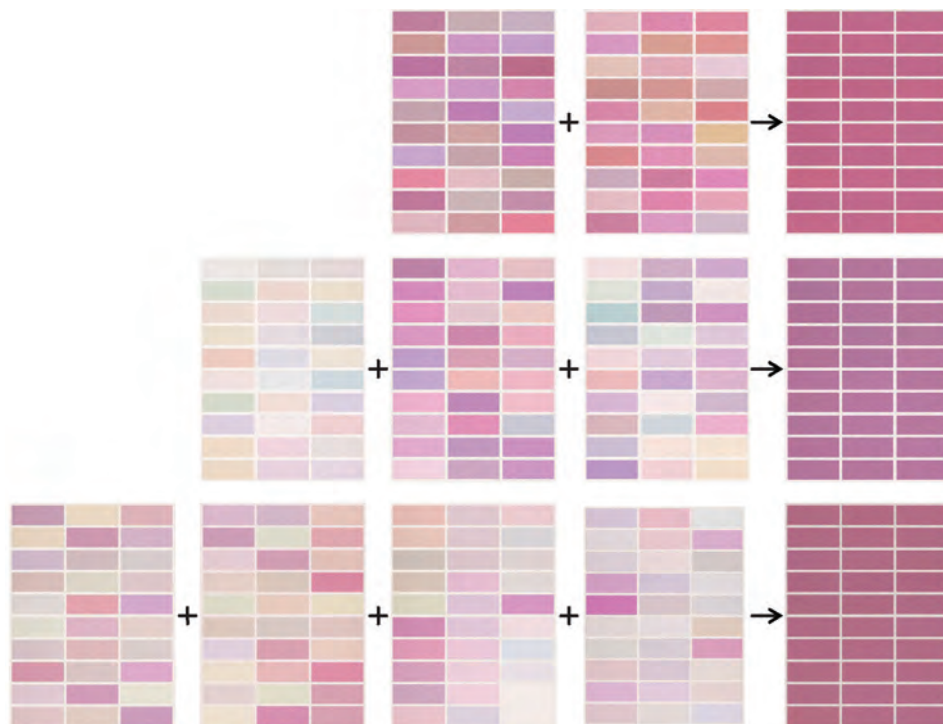


Fig. 20. Des rectangles colorés sont imprimés sur deux, trois ou quatre films, montrés à gauche des flèches. Les couleurs de chaque rectangle ont été calculées de sorte que tous les rectangles aient la même couleur lorsque les films sont superposés (images à droite).

La Figure 20 montre un exemple d’ajustement de couleurs par empilement de films [13], réalisé par Jacques Machizaud durant sa thèse que j’ai co-supervisée. Deux, trois ou quatre films sont superposés et observés devant une table lumineuse, donc en transmission. Sur chaque film sont imprimés des rectangles de différentes couleurs de sorte que tous ces rectangles aient la même couleur une fois les films superposés. En pratique, pour n films, les quantités d’encre appliquées sur les $n - 1$ premiers films sont choisies au hasard en veillant à ne pas dépasser les quantités totales d’encre capables de rendre la couleur finale. Les couleurs imprimées sur n ième film sont alors calculées par inversion du modèle prédictif du facteur spectral de transmission de la pile.

4.2. Gestion des couleurs d’imprimés multi-vues

Dans les exemples montrés ci-dessus, le design des images s’est fait en connaissance des limites de rendu atteignable. Puisque nos techniques d’impression multi-vues reposent uniquement sur des encres absorbantes, on ne peut réaliser une teinte claire en combinant des couleurs sombres. Cependant, ces contraintes restent à établir théoriquement, de sorte qu’elles puissent être clairement énoncées à un graphiste ne connaissant pas la théorie optique, voire intégrées à un module complémentaire pour un logiciel de conception graphique tel qu’Adobe Photoshop ou Illustrator qui saurait détecter des combinaisons de couleurs non permises.

La gestion des couleurs pour ces imprimés multi-vues doit permettre de choisir autant d’images qu’on a de modes d’éclairage-observation et de calculer les quantités d’encre à déposer à chaque niveau du système multicouche de sorte que ces images soient affichées dans les différents modes. Ceci passe par les étapes suivantes :

- déterminer le gamut dans chacun des modes d’éclairage-observation ; un modèle prédictif direct le permet sitôt que la densité spectrale de l’éclairage est connue ;
- déterminer par inversion du modèle prédictif quelles combinaisons de couleurs placées à chaque niveau du système multicouche permettent d’obtenir une couleur cible dans un mode d’éclairage-observation donné ; à chaque couleur vue dans un mode correspond une palette de couleurs possible pour chaque niveau ; dès qu’une couleur est choisie sur un niveau, la palette des autres niveaux se restreint – elle peut devenir une couleur unique ou un ensemble vide.
- calculer les quantités d’encre à déposer à chaque niveau du système multicouche de manière à afficher les couleurs ciblées dans les différents modes d’éclairage-observation ;
- savoir prédire qu’une couleur ne pourra être obtenue dans un mode à cause de la couleur voulue dans un autre mode ; on peut proposer de corriger les images numériques à reproduire de manière à ce qu’elles soient toutes affichables.

Ces étapes forment la trame d’une technique de “*multiview gamut mapping*” dont le développement figure au programme de la dernière année de thèse de Juan Martinez, après les ébauches réalisées par Jacques Machizaud et Serge Mazauric. Le principe est illustré pour l’impression recto-verso par le schéma de la Figure 21.

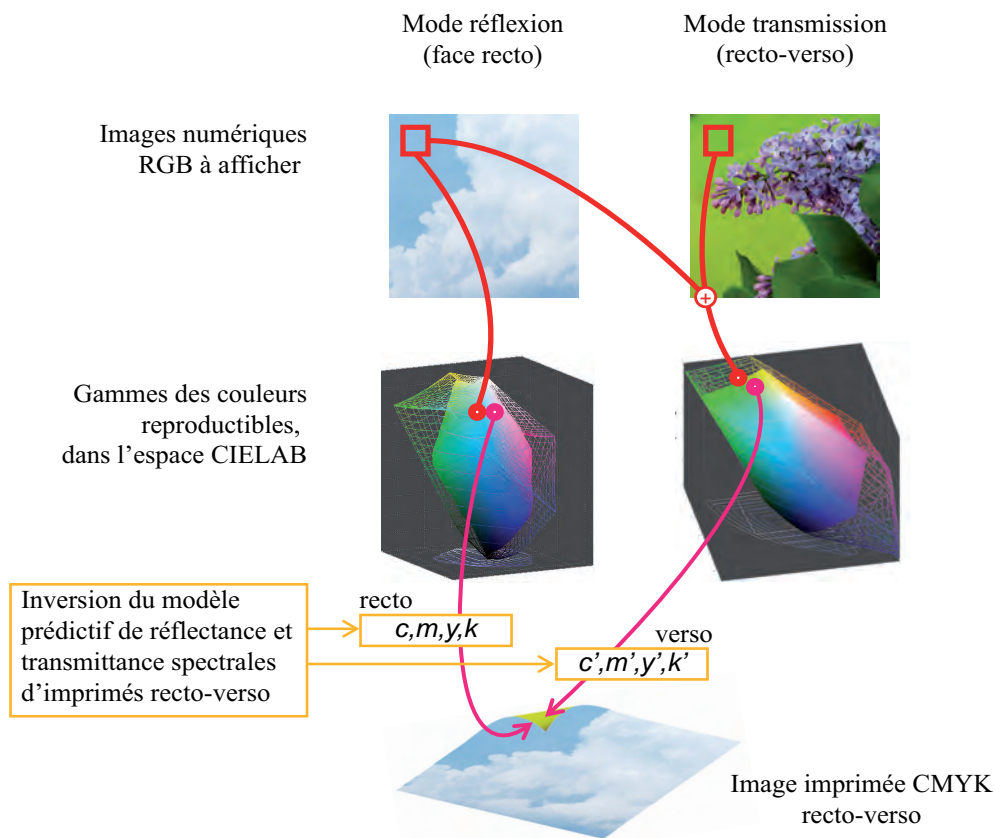


Fig. 21. Correspondance des couleurs en impression multi-vues (ici impression recto-verso).

4.3. Cryptographie visuelle en couleur

On peut imaginer d'appliquer ces configurations d'impression multi-vues à la signalétique ou l'affichage, avec par exemple des enseignes lumineuses ou des panneaux publicitaires qui afficheraient des images différentes lorsqu'ils sont éclairés du dehors en journée et rétro-éclairés la nuit. Aucune application concrète n'est pour le moment envisagée mais des projets avec la Cité du Design de Saint-Etienne sont prévus pour réaliser des prototypes associés à des usages particuliers. Pour l'heure, l'axe de valorisation privilégié est la sécurisation de documents, puisque le principe de faire apparaître différentes images par impression recto-verso ou par superpositions d'imprimés est difficile à copier par numérisation et réimpression. Ce principe est protégé par un brevet déposé conjointement par les tutelles du Laboratoire Hubert Curien et la société Arjowiggins Security [14].

L'industrie de l'impression sécurisée, chargée de produire les documents d'identité, billets de banque et autres timbres, est en quête permanente d'effets visuels marquants permettant à l'utilisateur ou au représentant d'une institution légale d'authentifier visuellement, rapidement et sans ambiguïté, l'authenticité du document. Cette industrie est bien représentée en France et en Suisse à travers plusieurs grandes entreprises : Gemalto, Oberthur, Orel-Füssli, Arjowiggins, Hologram Industries... Les éléments de sécurité intégrés au document sont dits de niveau 1 quand aucun outil n'est nécessaire à leur visualisation, ou de niveau 2 quand l'outil est accessible au plus grand nombre (loupe, petite lampe UV). Comme éléments de

sécurité de niveau 1, on peut citer les encres optiquement variables intégrées aux billets d'euros en circulation depuis 2013. Plusieurs autres solutions ont été inventées à base de supports métallisés [15] ou transparents [16], d'encres iridescentes [16-17] ou métalliques [12,18], d'éléments diffractifs ou couches minces [19-20], d'effets de moirés générés par superposition d'un révélateur ou d'une matrice de microlentilles [21] sur une image constituée de motifs périodiques [22-24] ou apériodiques [25]... Pour le niveau 2, on peut citer les demi-tons personnalisés à base de micro-motifs visibles à l'œil nu ou avec une loupe [26-31], et la révélation sous UV d'images cachées en couleurs, par impression d'encres fluorescentes invisibles [32-36]. Cette liste est loin d'être exhaustive, car la lutte contre la contrefaçon est un sujet actif de recherche et un débouché applicatif pour de nombreuses technologies.

Le Laboratoire Hubert Curien, à travers son équipe de recherche ERIS commune avec l'Institut d'Optique que j'ai intégrée en 2009, a développé un projet sur la sécurité opto-numérique. La thèse de Jacques Machizaud, que j'ai co-encadrée avec Thierry Fournel et Pierre Chavel, s'est déroulée dans ce cadre. Elle a porté sur la mise en œuvre d'un schéma de cryptographie visuelle à partir d'images imprimées, en introduisant la couleur comme moyen d'authentification des documents [37]. La cryptographie visuelle, introduite par Naor et Shamir en 1995 [38] est une technique de cryptographie où l'on transmet une image de manière sécurisée. L'image (binaire) est révélée par superposition d'images corrélées, chacune ne contenant individuellement aucune information. Une façon de vérifier visuellement que tous les imprimés sont authentiques est de faire apparaître un message de couleur uniforme : en supposant qu'un contrefacteur parvienne à copier une image avec un rendu fidèle des couleurs, l'obtention d'un message de couleur uniforme n'est pas garantie pour autant, les facteurs spectraux du support imprimé pouvant différer de ceux de l'original. Les couleurs imprimées sur chaque film sont donc calculées par modèle inverse de manière à produire une couleur uniforme dans les zones correspondant au message, et une mosaïque de couleurs contrastées en dehors de ces zones pour que le message se distingue du fond (Figure 22). Les couleurs sont également choisies de manière à ce que l'espion qui intercepte un film ne puisse deviner la couleur du message [39]. Cela signifie que la palette de couleurs utilisée pour un film doit être restreinte pour laisser une palette la plus large possible de couleurs potentielles pour le message : un film contenant du noir ne permet d'envisager qu'un message noir (à moins d'éviter le noir dans la zone du message au risque de laisser transparaître celui-ci, ce qui est banni dans un schéma de cryptographie) ; au contraire, avec un gris pâle, toutes les couleurs plus sombres, quelle que soit leur teinte, sont des couleurs potentielles de message.

D'autres configurations ont été envisagées pour révéler le message, par exemple en superposant un film imprimé sur un papier imprimé, ou en projetant une image lumineuse sur un papier imprimé. Pour le cas du film superposé au papier, un modèle spécifique a été élaboré [40]. Moyennant l'impression de 44 couleurs sur le film et sur le papier, et leur mesure en réflexion et en transmission pour le film, en réflexion seulement pour le papier, le modèle permet de prédire le facteur spectral de réflexion du film sur le papier quelles que soient les couleurs appliquées sur chacun, avec des performances prédictives satisfaisantes.

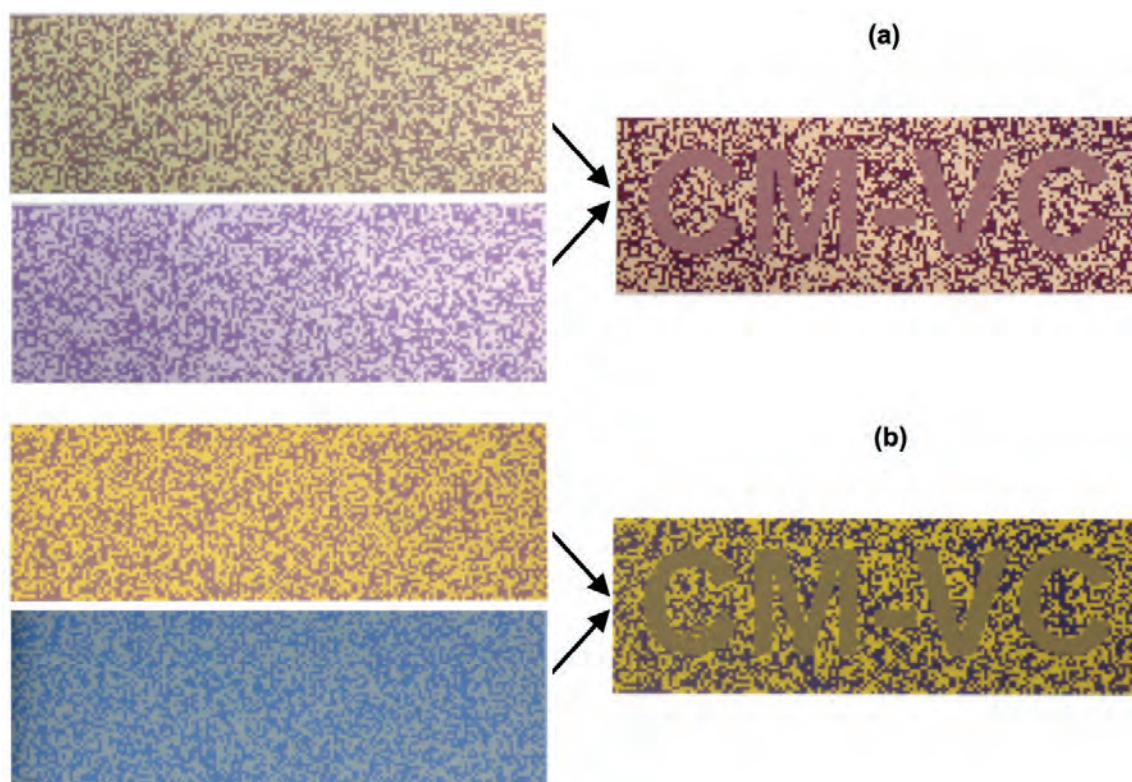


Fig. 22. Photos de films transparents imprimés par jet d'encre correspondant aux films individuels (*à gauche*) et à l'empilement des deux films (*à droite*), vus (a) en mode transmission (éclairage par l'arrière avec une table lumineuse) et (b) les films sont vus en mode réflexion devant un fond blanc (éclairage par l'avant par un flux diffus).

4.4. Impression par blanchiment de pigments

Avec les progrès de la photonique apparaissent de nouveaux procédés d'impression qui déplacent les paradigmes de l'impression classique en colorant les surfaces sans dépôt de matière, par insolation laser de surfaces pré-fonctionnalisées. Le procédé CLM (*Color Laser Marking*) [41] mis en œuvre par Gemalto révèle des couleurs dans les couches internes d'une carte d'identité contenant un mélange de pigments blanchissables. Ceci permet de personnaliser les cartes après fabrication, sans possibilité ultérieure d'effacer ou de modifier l'information inscrite. Le développement d'un autre procédé basé sur les mêmes principes visant une gamme de couleurs plus large a fait l'objet d'un projet européen Euripidès EURO-09-801 "COSEC_ID" (2010-2014) porté par Gemalto, dans lequel je pilotais la tâche « Visual rendering modelling and printing quality characterization ». Les questions traitées par David Nebouy dans son travail de thèse, que j'encadre depuis son démarrage en novembre 2012, portent sur la gestion des couleurs du système et sur l'évaluation de la qualité d'impression. Les cartes sont colorées de manière quasi-continue, spectralement et spatialement (sans demi-tons), comme en photographie argentique. La gamme de couleur est cependant assez restreinte. La Figure 23 montre les couleurs de l'encre non blanchie et blanchie avec différentes puissances de lasers.

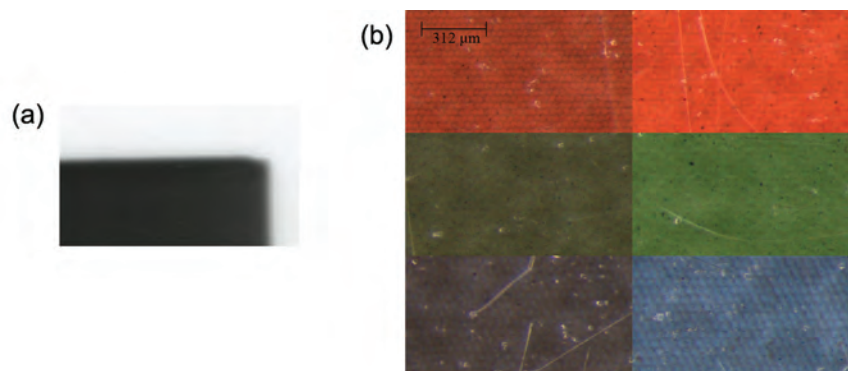


Fig. 23. (a) Encre blanchissable déposée dans les couches internes d'un support multicouche en polycarbonate. (b) La même encre blanchie par un laser rouge (ligne du haut), vert (ligne du milieu) ou bleu (ligne du bas) à deux puissances différentes. La puissance la plus élevée donne les tons les plus clairs.

Les critères de qualité pour l'impression à encres en demi-ton, qui s'expriment surtout en termes de résolution et de défauts, sont bien établis ([2], p. 99). Des critères plus généraux ont été récemment proposés pour l'évaluation d'une image imprimée [42], à partir d'attributs tels que la couleur, la netteté, le contraste, la luminosité et les défauts, évalués selon des expériences psycho-visuelles. Mais des critères physiquement mesurables sur la qualité d'impression elle-même, indépendamment de l'image, faisaient défaut. Nous avons d'abord proposé une définition de la « qualité photographique » [43] et défini des critères comme l'homogénéité des aplats [44], la continuité des dégradés, la netteté des contours, la pureté chromatique que nous cherchons à évaluer par traitement d'image, à partir d'images scannées d'imprimés divers.

Concernant la gestion des couleurs du système, la réaction des pigments à l'insolation par les lasers est complexe et la correspondance entre les couleurs obtenues et les puissances des lasers est fortement non-linéaire. Pour établir la table de correspondance (*look-up table*) permettant au pilote de gérer correctement les couleurs, la mesure de milliers d'échantillons serait nécessaire sans le recours à un modèle prédictif que nous avons entrepris d'élaborer. Les transferts de flux dans un imprimé à couche colorante uniforme sont simples à modéliser quand on connaît les coefficients d'absorption des pigments utilisés. En l'occurrence ici, on peut utiliser le modèle de Berns [45]. Cependant, ces pigments ne sont pas connus et leur absorbance spectrale tend à varier par effets thermiques dus aux lasers. Il en résulte que la dimensionnalité spectrale du système d'impression n'est pas 3 comme en impression classique à trois encres, mais au moins 4 [46]. Nous avons donc eu recours à des méthodes d'apprentissage à partir des facteurs spectraux de réflexion de 130 couleurs imprimées : d'abord une analyse en composantes principales pour obtenir l'absorbance spectrale de pigments « virtuels », puis une transformation polynomiale pour établir la correspondance entre les quantités de ces pigments virtuels et les puissances de laser commandées par les valeurs RGB de l'image numérique d'entrée [47]. Avec six pigments virtuels, le ΔE_{94} moyen entre les spectres prédits et mesurés pour presque 400 échantillons est de 1.2 unité, avec un maximum à 3.1, ce qui représente une performance intéressante dans ce contexte et suffisante pour générer une prévisualisation réaliste du rendu des couleurs sur ordinateur. Le nombre

d'échantillons utilisé pour le calibrage du modèle peut être réduit si on accepte une perte de précision somme toute modeste : le ΔE_{94} moyen croît de 0,15 unité avec 65 couleurs au lieu de 130.

Le modèle sert de base à la gestion des couleurs du système d'impression. Cependant, à cause de l'usage de pigments virtuels, il n'est pas possible de simuler pour le moment les variations de couleurs qui découleraient d'un changement dans le mélange des pigments réels.

4.5. Impression de lustres métalliques par laser

Le procédé de coloration de surfaces en verre développé au Laboratoire Hubert Curien, baptisé Picslup, repose sur la croissance contrôlée de nanoparticules d'argent dans un substrat de dioxyde de titane mésoporeux au passage d'un faisceau laser. Je contribue au projet "Photoflex" (ANR-12-NANO-0006, 2013-2017), qui vise à étendre ce procédé aux supports souples, en supervisant la tâche « Calibration and visual rendering assessment ». Ces nanoparticules, coplanaires et plus ou moins organisées, génèrent plusieurs effets optiques conduisant à des effets colorés : absorption dans certaines bandes spectrales par résonance plasmon, et interférences. Les paramètres de commande du procédé sont : la longueur d'onde du laser, sa puissance, sa polarisation, la focalisation et la vitesse de balayage du faisceau. Comme l'illustre la Figure 24, la surface traitée peut prendre des couleurs très différentes selon qu'elle est observée en réflexion – dans la direction spéculaire ou en dehors – ou en transmission. Ces couleurs varient encore selon la polarisation de la lumière [48-49]. Le système d'impression est donc intrinsèquement multi-vues : il n'est pas nécessaire de superposer des faces imprimées pour créer des images différentes selon le mode d'éclairage-observation, contrairement à nos développements en impression classique.



Fig. 24. Image inscrite par laser sur verre enduit d'oxyde de titane (2×2 cm), éclairée par l'avant (à gauche), de côté (au centre) et par l'arrière (à droite).

La métrologie de ces surfaces est particulièrement ardue du fait qu'elles sont très spéculaires et que les échantillons produits sont souvent de taille microscopique, donc à mesurer par microscope équipé d'une camera RGB. Pour calibrer colorimétriquement la camera RGB, Renée Charrière, que j'ai supervisée pendant ses 18 mois de post-doctorat au laboratoire, a dû revisiter les méthodes usuelles de calibrage de caméra par mires colorimétriques : celles-ci ne sont pas homogènes à l'échelle microscopique et l'éclairage n'est pas uniforme sur l'étendue du champ (Figure 25). Le problème était donc de retrouver « la » couleur de chaque patch de la mire. Grâce à un algorithme spécifique gérant les hétérogénéités et l'illuminant, nous

sommes finalement parvenus à un calibrage aussi précis que les méthodes macroscopiques de la littérature, moyennant des précorrections (balance des blancs, ajustement du facteur gamma et du spectre de l'illuminant...) et une régression polynomiale d'ordre trois [50].

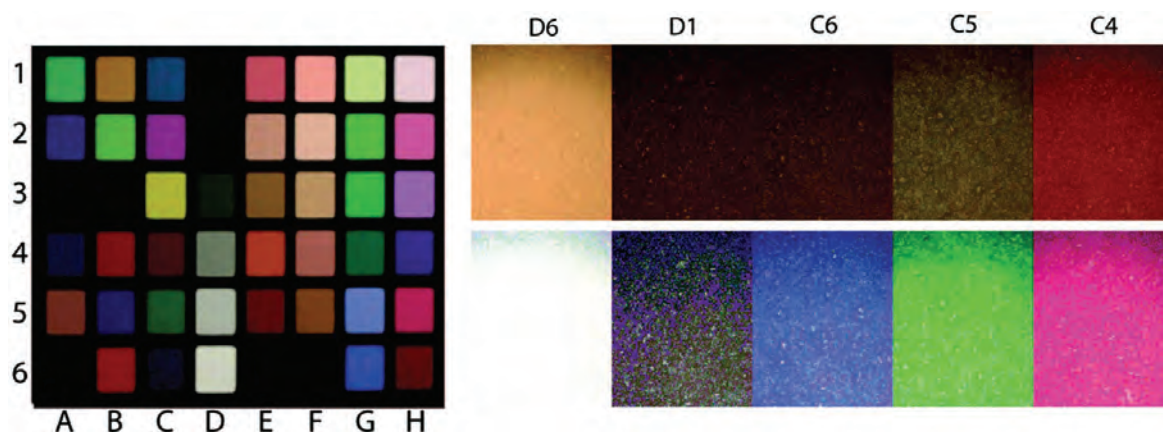


Fig. 25. *A gauche* : mire colorimétrique diffuseuse utilisée pour l'étalonnage colorimétrique du microscope. *A droite* : cinq images de patches vues par la caméra du microscope avant (ligne du haut) et après (ligne du bas) calibration.

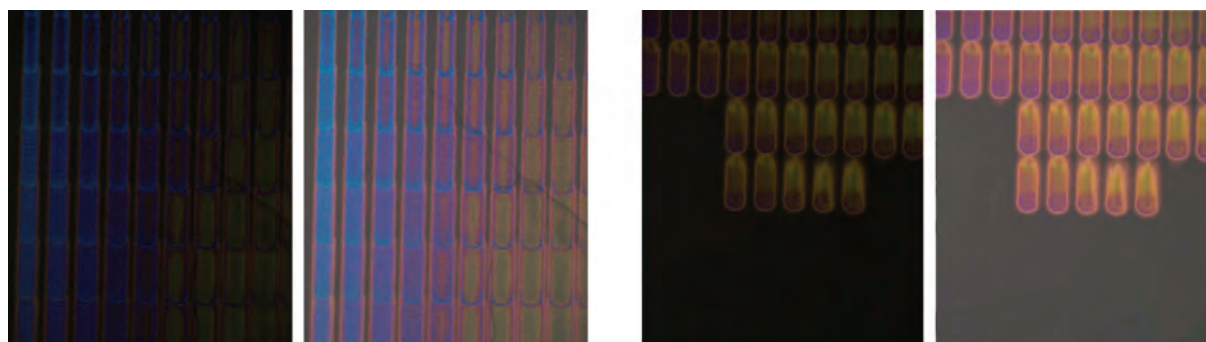


Fig. 26. Images de surfaces colorées par le procédé Picslup prises par la caméra d'un microscope avant (*images de gauche*) et après (*images de droite*) calibrage colorimétrique.

Cependant, cette méthode ne peut s'appliquer directement aux échantillons spéculaires, car ceux-ci réfléchissent une luminance beaucoup plus élevée que la mire diffuseuse, ce qui conduit à saturer la caméra calibrée avec la mire. Or, il n'existe aucune mire colorimétrique spéculaire. Juan Martinez, dont la thèse financée par le contrat ANR a pour but de caractériser les effets colorés et proposer un système de gestion des couleurs pour ce procédé, a montré qu'un calibrage performant peut être réalisé avec des gélamines colorées posées sur un miroir [51]. La Figure 26 montre deux images de micro-inscriptions sur verre prises avec la caméra du microscope, avant et après calibrage.

Les couleurs générées par le procédé Picslup ne sont pas encore prédictibles par modèle optique : l'étalonnage colorimétrique se fait donc par la mesure exhaustive d'échantillons. Le gamut en réflexion à incidence normale est bien plus réduit que celui d'une imprimante jet d'encre sur papier, comme le montre la Figure 27. Il a la particularité de ne pas pouvoir

produire de noir ni de blanc. Nous travaillons actuellement à l'impression en demi-ton avec ce système pour étendre les gammes de couleurs et démultiplier les combinaisons de couleurs visibles dans les différents modes.

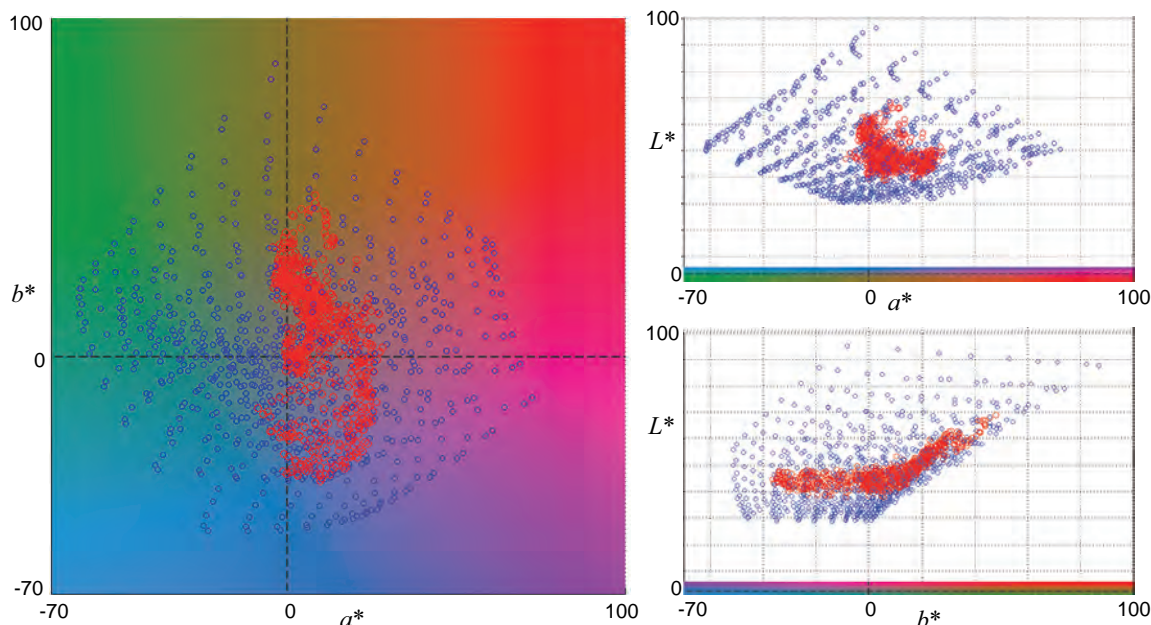


Fig. 27. Couleurs reproductibles par le procédé Picslup (points rouges) et par l'imprimante jet d'encre Canon PixmaPro9500 (points bleus) représentées dans l'espace CIELAB selon trois points de vue : plan (a^* , b^*), plan (L^* , a^*) et plan (L^* , b^*).

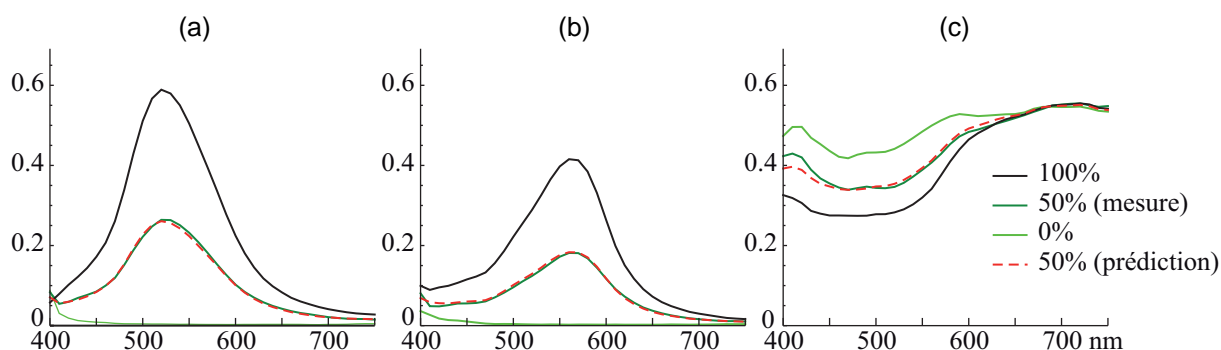


Fig. 28. Facteurs de luminance de supports en verre colorés par le procédé Picslup avec des taux de couverture 100%, 50%, et 0% (support non inscrit) : (a) en réflexion en lumière naturelle (géométrie 8°:45°), (b) en réflexion en lumière polarisée (même géométrie), (c) en transmission (géométrie 0°:0°). Les prédictions sont données par le modèle Yule-Nielsen avec $n = 1.42$ en réflexion, et $n = 1$ en transmission.

Pour prédire les couleurs en demi-ton, le modèle de Neugebauer corrigé par Yule-Nielsen semble offrir une bonne précision d'après nos premières observations. A titre d'exemple, les spectres mesurés et prédits tracés dans la Figure 28 correspondent à un demi-ton produit sur verre en inscrivant une ligne sur deux, avec un espacement entre lignes de l'ordre de 50 μm . Sans surprise, les valeurs du paramètre n de Yule-Nielsen sont faibles compte tenu de

l'absence de diffusion dans le support et la couche colorante, même si les réflexions multiples dans la plaque de verre induisent un léger engraissement : en mode réflexion où l'on éclaire l'échantillon à 8° de la normale et on observe à 45° dans le plan d'incidence, la valeur de n est 1.4 (graphes *a* et *b*) ; en mode transmission, où l'on éclaire et observe l'échantillon selon sa normale, la valeur optimale de n est 1, ce qui signifie que l'engraissement optique est nul. Notons que le taux de couverture estimé est de 0.55, ce qui est conforme à la forme des lignes inscrites observée par microscope. Le test exhaustif du modèle sur d'autres échantillons et d'autres géométries est en cours. On notera la différence notable du facteur de réflexion lorsque l'échantillon est éclairé en lumière naturelle (graphe *a*) ou en lumière polarisée (graphe *b*), ce qui ne peut s'obtenir avec des encres absorbantes.

Le modèle prédictif du facteur de réflexion ou de transmission des demi-tons demande de mesurer celui des nombreuses primaires, à partir d'échantillons inscrits parfois très petits. Or le microscope ne permet que des mesures à incidence et observation selon la normale. Comme alternative au microscope, nous travaillons sur l'utilisation d'imagerie multispectrale à haute résolution. Une fois les gamuts estimés dans chacun des modes de vue, nous pourrions démarrer le développement d'une technique de *gamut mapping* multi-vues, concept introduit dans le § 4.1 (Figure 21) et dont la pertinence s'impose avec le procédé Picslup.

4.6. Conclusion

Dans ce chapitre consacré à la gestion des couleurs pour des configurations d'impression inédites, deux mouvements à première vue contradictoires se dessinent. Le premier consiste à revendiquer l'usage de la modélisation optique pour gérer les couleurs plutôt que des approches purement numériques qui requièrent beaucoup d'échantillons. Le deuxième prône au contraire l'usage des méthodes numériques au secours des modèles optiques lorsque ceux-ci ne peuvent s'appliquer, comme c'est le cas par exemple avec les méthodes de marquage laser. Ces deux mouvements sont en réalité complémentaires : entre modèles physiques et modèles numériques, le curseur doit être placé là où la méthode la plus simple permet une gestion des couleurs la plus fiable. C'est précisément à l'interface entre optique et numérique que les solutions les plus prometteuses de gestion de l'apparence sont à rechercher.

Concernant la valorisation des résultats présentés ici, nous devons regretter de ne pas avoir produit suffisamment de prototypes permettant d'afficher leur potentiel. Nos exemples servent surtout de preuve de concept – c'est pour vérifier visuellement la précision du modèle prédictif et de son modèle inverse que nous avons produit les empilements de films montrés dans la Figure 20 – mais ils n'ont pas de véritable valeur graphique. La valorisation nécessite les compétences de graphistes et des designers, et des collaborations à ces fins sont déjà envisagées.

4.7. Références

1. J. Morovic, "Gamut mapping," in *Digital color imaging handbook*, CRC Press, pp. 647-693 (2003).
2. H. Kipphan, "Computer to... technologies," in *Handbook of Print Media*, Springer, Chapter 4, pp. 579-674 (2001).

3. E. J. Stollnitz, *Reproducing Color Images with Custom Inks*, PhD dissertation, University of Washington (1998).
4. S. Chosson, R.D. Hersch, "Color Gamut Reduction Techniques for Printing with Custom Inks," *Proc. SPIE* **4663**, 10–120 (2002).
5. Y. Chen, R. S. Berns, L. A. Taplin, F. H. Imai, "A Multi-Ink Color-Separation Algorithm," *Proc. IS&T/SID* 11th Color Imaging Conference, 277–281 (2003).
6. J. Gerhardt, J. Y. Hardeberg, "Characterization of an eight colorant inkjet system for spectral color reproduction," *Proc. CGIV*, 263–267 (2004).
7. P. Urban, M. R. Rosen, R. S. Berns, "Fast Spectral-Based Separation of Multispectral Images," *Proc. IS&T/SID* 15th Color Imaging Conference, 178–183 (2007).
8. D.-Y. Tzeng, R. S. Berns, "Spectral-Based Six-Color Separation Minimizing Metamerism," *Proc. IS&T/SID* 8th Color Imaging Conference, 342–347 (2000).
9. P. Urban, R. S. Berns, "Paramer Mismatch-based Spectral Gamut Mapping," *IEEE Transactions on Image Processing* **20**, 1599–1610 (2011).
10. T. Baar, M. Shahpaski, M. V. Ortiz Segovia, "Image ghosting reduction in lenticular relief prints," *Proc. SPIE* **9018**, paper 90180N (2014).
11. R. Rossier, R. D. Hersch, "Hiding patterns with daylight fluorescent inks," *Proc. IS&T* 19th Color and Imaging Conference, 223–228 (2011).
12. R.D. Hersch, F. Collaud, P. Emmel, "Reproducing color images with embedded metallic patterns," *ACM Trans. Graph.* **22** (SIGGRAPH'03), 427–436 (2003).
13. J. Machizaud, M. Hébert, "Spectral transmittance model for stacks of transparencies printed with halftone colors," *Proc. SPIE* **8292**, Paper 829212 (2012).
14. T. Fournel, M. Hébert, M. Camus, C. Halope, J. Machizaud, Cas 370-FR "Color Matching", demande PCT n° PCT/FR/2013/052087 du 11/09/13, « Procédé d'authentification d'un élément de sécurité par superposition de n images partagées en couleur et élément de sécurité mettant en œuvre ce procédé ».
15. P. Pjanic, R.D.Hersch, "Specular color imaging on a metallic substrate," *Proc. IS&T* 21st Color and Imaging Conference, 61–68 (2013).
16. L. Vermeulen, D. De Baets, "Security document having a transparent or translucent support and containing interference pigments," US Patent 6210777-B1 (2001).
17. P. Dietemann, "Security film comprising an iridescent security mark," Demande de brevet EP20080845886 (2010).
18. V. Babaei, R.D. Hersch, "Yule-Nielsen based multi-angle reflectance prediction of metallic halftones" *Proc. SPIE* **9395**, paper 93950H, (2015).
19. P. H. L. Wood, "The problem, solution, and the results: holography combating counterfeit," *Proc. SPIE* **1210**, paper 47 (1990).
20. H. Bretler, "Thin-film devices in security printing inks," *Proc. SPIE* **1210**, paper 78 (1990).
21. L. G. Commander, C. J. Eastell, R. Isherwood, B. W. Holmes, "Arrays of microlenses and arrays of microimages on transparent security substrates," Patent Application EP20130168692 (2013).
22. S. Chosson, R. D. Hersch, "Beating Shapes Relying on Moiré Level Lines," *ACM Trans. Graph.* **34** (SIGGRAPH '14), Article 9 (2014).
23. R. D. Hersch, S. Chosson. "Band moiré images," *ACM Trans. Graph.* **23** (SIGGRAPH '04), 239–247 (2004).
24. I. Amidror, R. D. Hersch, "Authentication with built-in encryption by using moire parallax effects between fixed correlated s-random layers," Patent 8351087 (2013).
25. S. Shen, Y. Lou, J. Hu, Y. Zhou, L. Chen, "Realization of Glass patterns by a microlens array," *Opt. Lett.* **37**, 4248–4250 (2012).
26. N. Rudaz, R.D. Hersch, "Protecting identity documents by microstructure color differences," *J. Electron. Imaging* **13**, 315–323 (2004).
27. N. Rudaz, *Incrustation de microstructures par écarts chromatiques*, Thèse de doctorat No 2757, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (2003).
28. N. Rudaz, R.D. Hersch, "Protecting identity documents with a just noticeable microstructure," *SPIE Proc.* **4677**, 101–109 (2002).
29. V. Ostromoukhov, N. Rudaz, I. Amidror, P. Emmel, R.D. Hersch, "Anti-Counterfeiting Features of Artistic Screening," *SPIE Proc.* **2951**, 126–133 (1996).

30. G. Braudaway, K. Magerlein, and F. Mintzer, "Protecting publicly available images with a visible image watermark", *Proc. SPIE* **2659**, 126–133 (1996).
31. V. Ostromoukhov, R. D. Hersch, "Artistic screening," *Proc. ACM* **22** (SIGGRAPH' 95), 219-228 (1995).
32. W. J. Coyle, J. C. Smith, "Methods and ink compositions for invisibly printed security images having multiple authentication features," US Patent Application US7821675 B2 (2010).
33. P. Emmel, R. D. Hersch, "Spectral Color Prediction Model for a Transparent Fluorescent Ink on Paper," *Proc. IS&T 6th Color Imaging Conf.*, 116–122 (1998).
34. R.D. Hersch, P. Donzé, S. Chosson, "Color images visible under UV light," *ACM Trans. Graph.* **26** (SIGGRAPH '07), Paper 75 (2007).
35. R. L. Van Renesse, "Printing Inks and Printing Techniques," in *Optical Document Security*, Artech House, London, 3rd edition, Chapter 4, 98–104 (2005).
36. J. Andres, R. D. Hersch, J.-E. Moser, A.-S. Chauvin, "A New Anti-Counterfeiting Feature Relying on Invisible Luminescent Full Color Images Printed with Lanthanide-Based Inks," *Adv. Funct. Mater.* **24**, 5029–5036 (2014).
37. J. Machizaud, *Cryptographie visuelle pour l'authentification de documents*, thèse de doctorat, Université Jean Monnet de Saint-Etienne, France (2012).
38. M. Naor and A. Shamir, "Visual cryptography," *Lecture Notes in Computer Science* **950**, 1–12 (1995).
39. J. Machizaud, T. Fournel, "Two-out-of-two color matching based visual cryptography schemes," *Optics Express* **20**, 22847–22859 (2012).
40. J. Machizaud, M. Hébert, "Spectral reflectance and transmittance prediction model for stacked transparency and paper both printed with halftone colors," *J. Opt. Soc. Am. A* **29**, 1537-1548 (2012).
41. T. Sakagami, A. Hashimoto, Y. Teraji, "Multicolor-development laser marking sheet for card, and laser marking method," Patent WO 2013031399 A1 (2013).
42. M. Pedersen, N. Bonnier, J. Y. Hardeberg *et al.*, "Attributes of a New Image Quality Model for Color Prints," *Proc. IS&T/SID 17th Color and Imaging Conference*, 204-209 (2009).
43. M. Hébert, "Photographic quality in printing," Rapport de recherche pour le projet Euripidès EURO-09-801 "COSEC_ID", Novembre 2010.
44. D. Nebouy, M. Hébert, T. Fournel, J.-L. Lesur, "Visual quality of printed surfaces: study of homogeneity," *Proc. SPIE* **9016**, paper 90160C (2014).
45. R. S. Berns, "Spectral modeling of a dye diffusion thermal transfer printer." *J. Electron. Imaging* **2**, 359-370 (1993).
46. M. Hébert, D. Nébouy, S. Mazauric, "Color and spectral mixings in printed surfaces," *Proc. LNCS* **9016**, 3–15 (2015).
47. D. Nébouy, M. Hébert, T. Fournel, N. Larina, J.-L. Lesur, "Prediction of the spectral reflectance of laser-generated color prints by combination of an optical model and learning methods," *J. Opt. Soc. Am. A* **32**, 1661-1671 (2015).
48. N. Destouches, J. Martínez, M. Hébert, N. Crespo-Monteiro, G. Vitrant, Z. Liu, A. Trémeau, F. Vocanson, F. Pigeon, S. Reynaud, Y. Lefkir, "Dichroic colored luster of laser-induced silver nanoparticle gratings buried in dense inorganic films," *J. Opt. Soc. Am. B* **31**, 1–7 (2014).
49. N. Destouches, N. Crespo-Monteiro, T. Epicier, Y. Lefkir, F. Vocanson, S. Reynaud, R. Charrière, M. Hébert, "Permanent dichroic coloring of surfaces by laser-induced formation of chain-like self-organized silver nanoparticles within crystalline titania films," *Proc. SPIE* **8609**, paper 860905 (2013).
50. R. Charrière, M. Hébert, A. Trémeau, N. Destouches, "Color calibration of an RGB camera mounted in front of a microscope with strong color distortion," *Appl. Opt.* **52**, 5262–5271 (2013).
51. J. Martinez, M. Hébert, A. Trémeau, "Color calibration of an RGB digital camera for the microscopic observation of highly specular materials," *Proc. SPIE* **9398**, paper 93980I (2015).

Chapitre 5.

Perspectives : au-delà de la couleur

La couleur des surfaces imprimées a occupé l'essentiel de mes activités de recherche ces dix dernières années, et elle mérite encore de s'y consacrer. Mais la part d'activité dédiée à d'autres types de surfaces s'accroît depuis 2012, date à laquelle j'ai commencé à proposer de manière systématique des projets d'étudiants en association avec des partenaires industriels ou académiques, qui forment un laboratoire d'idées visant à élaborer ensuite des projets de recherche plus ambitieux. Dans ce chapitre dédié à ma démarche prospective, je propose d'aborder en premier les sujets relatifs à l'impression en continuité avec les chapitres précédents, pour ouvrir ensuite sur d'autres sujets en cours d'exploration en prenant comme point de départ les projets d'étudiants réalisés.

5.1. Impression : de la surface au volume

A partir de l'expérience de modélisation acquise ces dernières années pour les surfaces imprimées, plusieurs axes de recherche méritent d'être approfondis outre ceux déjà évoqués dans le chapitre précédent – proposer un algorithme général de “*multi-view gamut mapping*”, obtenir des images recto-verso stéganographiques par éclairage sur leurs deux faces...

L'impression recto-verso et l'empilement d'imprimés deviennent vraiment intéressants à étudier avec des matériaux semi-translucides, qu'il s'agisse des supports ou des encres. Les effets de transparence pourraient générer des effets graphiques encore plus attrayants que ceux obtenus jusqu'à présent avec des supports quasi-opaques. Sur le plan scientifique, ces matériaux semi-translucides défient les modèles à deux flux. Si ces derniers devaient s'avérer incapables de prédire correctement les facteurs de réflexion et de transmission de l'imprimé dans des conditions d'éclairage et d'observation courantes, la première approche à tester serait l'extension à quatre flux, qui modélise les échanges mutuels entre deux flux collimatés et deux flux diffus se propageant dans des directions opposées [1-5]. Un travail collaboratif est en cours sur ce sujet avec Lionel Simonot de l'Université de Poitiers, Roger Hersch de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, et Serge Mazauric du Laboratoire Hubert Curien. L'extension à N flux [6-7] est aussi possible mais demande des mesures goniométriques plus difficiles à réaliser en dehors d'un laboratoire de recherche.

Le bronzage des encres, introduit dans le § 3.6, est aussi une piste de recherche à approfondir. Bien que les fabricants de systèmes d'impression cherchent à l'éviter, nous pensons que des effets graphiques intéressants pourraient être générés à partir d'encres très absorbantes dans certaines bandes spectrales. La question sur laquelle nous travaillons actuellement au Laboratoire Hubert Curien avec Raphaël Clerc, enseignant-chercheur, et Victorien Raulot, post-doctorant, est la mesure de l'indice complexe de réfraction des encres : la surface est trop

diffusante pour permettre une mesure fiable par ellipsométrie ; nous cherchons donc un moyen d'obtenir les indices par mesures macroscopiques de facteurs spectraux de réflexion et de transmission de films imprimés, où l'épaisseur de la couche d'encre doit être également estimée. Une fois les indices et l'épaisseur connus, on doit pouvoir prédire le facteur de réflexion de couches d'encres empilées sur un fond diffusant imperméables. Cette perspective ouvre sur le problème à ce jour non résolu de la gestion des couleurs en *surimpression*. Lorsque plusieurs couches d'encres se recouvrent sur un support, il est difficile de prédire la couleur de l'aire de recouvrement à partir des couleurs individuelles des encres. Celle-ci dépend souvent de l'ordre de superposition des encres, à cause de la structure plus ou moins nette des couches, de leur éventuelle pénétration dans le support, d'effets de bronzage par l'encre située en superficie, ou bien d'effets de diffusion lumineuse. La carte de visite originale de Melissa Olen, doctorante à l'University of the West of England, reproduite Figure 29, les variations de couleur du noir polychrome selon l'ordre d'impression des trois encres cyan, magenta et jaune. La surimpression est aussi utilisée dans l'édition afin de renforcer l'éclat des couleurs, notamment pour la reproduction d'œuvres peintes ou de photographies. La gestion des couleurs nécessite alors de mesurer les facteurs spectraux de réflexion de toutes les combinaisons de superposition d'encres, ce qui représente une contrainte importante surtout lorsque le nombre d'encres est supérieur à trois. Proposer un modèle tenant compte des effets de bronzage et de diffusion pour prédire la couleur des aires surimprimées est un défi intéressant à relever.

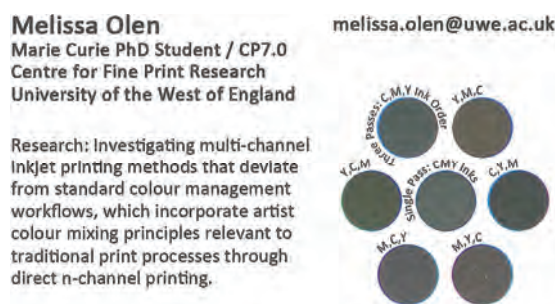


Fig. 29. Image scannée d'une carte de visite dont la partie graphique originale montre les différences de teinte obtenues pour le noir polychrome selon l'ordre d'impression des encres cyan, magenta et jaune en trois passes.

Le développement des imprimantes 2.5D¹ et 3D ouvre des perspectives enthousiasmantes, avec l'enjeu de reproduire non plus seulement la couleur de surfaces mais leur apparence globale : le brillant peut être contrôlé en définissant une topologie de surface de la couche supérieure d'encre qui peut présenter un profil rugueux pour une finition mate ou être lissée par un vernis pour une finition brillante [8] ; des effets de relief peuvent être créés [9] ; la texture visuelle peut être ajustée grâce à la bonne résolution des imprimantes pour produire un

¹ L'impression dite « 2.5D » ou impression en relief, dépose les encres en couches sur un support plan. Il ne s'agit donc pas véritablement d'impression 3D capable de générer une variété de formes plus large. Les encres sont polymérisées à chaque passe. L'épaisseur de dépôt peut varier de 0 à 2 cm en chaque « pixel », à une résolution inférieure à 100 µm.

aspect très homogène ou afficher des macro-motifs [10-11] ; la translucidité est ajustable grâce à la juxtaposition de gouttes d'encres opaques et transparentes [12-13]... Pour ce qu'on peut voir à travers les publications, la modélisation des propriétés optiques de ces imprimés nouvelle génération est loin d'être parvenue à maturité. On retrouve des empilements de couches colorantes en demi-tons, que nous avons commencé à étudier avec Serge Mazauric. Intervient également la problématique des matériaux semi-translucides auxquels nos modèles de transfert de flux méritent d'être confrontés. Des partenariats avec le centre de recherche et développement d'Océ Canon Group à Créteil en France et le Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung IGD à Munich en Allemagne sont amorcés sur ces sujets.

Une application inattendue des modèles développés pour les empilements de supports transparents imprimés non symétriques est en train d'apparaître avec le projet de l'artiste sculpteur Thomasine Giesecke [14] visant à réaliser une sculpture par empilement de plaques de verre colorées selon la technique d'impression de lustre métallique décrite dans le § 4.5. Des prédictions de rendu coloré en fonction des couleurs individuelles de plaques de verre imprimées sont souhaitées pour la conception de cette œuvre.

Une autre piste de recherche est aussi en cours d'exploration autour de surfaces lumineuses, mêlant l'impression et l'émission ou le guidage de lumière en vue de produire des effets esthétiques pour la décoration ou l'éclairage.

5.2. Métrologie optique du rendu visuel: recherche et formation

L'apparence ne se résume pas à la couleur. Nous venons de le dire pour les nouvelles techniques d'impression en volume, mais cela vaut surtout pour des objets à apparence complexe comme les revêtement automobiles ou les tissus satinés et scintillants [15-18]. Les différentes formes de brillant, la translucidité, et la texture visuelle peuvent prendre une part considérable dans l'apparence globale de l'objet, tout en posant des problèmes quant à la manière dont ils sont perçus et la possibilité de les mesurer objectivement. Or c'est pour des problèmes d'apparence globale que l'industrie nous sollicite aujourd'hui. Comme annoncé dans l'introduction, ces problèmes ne peuvent être résolus qu'en associant de multiples compétences : physique, imagerie, informatique, métrologie sensorielle, design, cognitive, sciences humaines... La part que peut traiter le physicien concerne d'abord la nature et la structure de la matière et l'interaction de la lumière avec celle-ci, suivant deux approches possibles : la modélisation, qui requiert un temps d'étude souvent long de niveau doctoral au minimum, ou la mesure optique, qui peut se faire avec des étudiants de niveau master aussi bien pour la conception d'un dispositif de mesure que pour l'analyse de données mesurées.

Afin de répondre à des problématiques concrètes de rendu visuel émanant de l'industrie ou de la recherche, j'ai proposé de mettre à profit le temps de formation pratique dédié aux projets en deuxième année d'études d'ingénieur à l'Institut d'Optique Graduate School. L'intégralité des projets de vingt heures, conduits par binôme, et une partie des projets de trente-deux heures sont ainsi associés à des entreprises ou des laboratoires. Les études sont gratuites et sans obligation de résultat, mais elles conduisent le plus souvent à des résultats exploitables pour le partenaire et débouchent parfois sur des études plus poussées. L'objectif de ce

dispositif est triple : premièrement, tenter d'apporter à nos partenaires des solutions à des problèmes relevant de l'optique ; deuxièmement, explorer des thématiques de recherche nouvelles et mieux cerner les enjeux applicatifs ; troisièmement, former les étudiants-ingénieurs de deuxième année à des problématiques scientifiques et techniques concrètes (certaines sur le rendu visuel et l'éclairage, d'autres sur l'imagerie médicale), en interaction avec le monde professionnel. La communication de résultats d'étude à des partenaires non experts constitue une part essentielle de la formation, particulièrement appréciée par les élèves qui effectueront leur stage dans un environnement dépourvu d'experts en optique.

La liste (non exhaustive) de projets déjà réalisés que je présente ci-dessous donne un aperçu de thématiques autour de la couleur ou l'apparence qui pourraient prendre de l'ampleur dans mon projet à venir, ou viennent simplement enrichir la liste d'idées exploitables pour innover dans le domaine du *computational printing* :

- *Effets de moirés par superposition de films imprimés avec des motifs périodiques* : deux projets en 2012 et 2014 avec le Laboratoire Hubert Curien. Un étudiant a démarré une thèse en 2014 à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne sur ce sujet après y avoir effectué deux stages. Un troisième projet incorporant des supports diffusants est prévu à l'automne 2015.
- *Modèle de propagation lumineuse dans des lames phosphorescentes* : deux projets en 2013 et 2014 avec le laboratoire Charles Fabry à Palaiseau. Les supports phosphorescents sont de plus en plus évoqués comme solution d'affichage. L'objectif de ces projets était d'étudier les propriétés photométriques et colorimétriques de petits échantillons de supports phosphorescents commercialisés pour calculer jusqu'à quelle taille de support on peut espérer avoir une émission lumineuse suffisante pour un affichage.
- *Calibrage colorimétrique de caméra RGB* : un premier projet en 2012 a été réalisé en partenariat avec le Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques, où l'étudiant a ensuite effectué un stage pour identifier des vernis traditionnels par imagerie couleur grâce à leur signature de fluorescence sous éclairage UV. Deux autres projets ont porté en 2013 sur la perturbation du calibrage colorimétrique de caméras due au brillant des mires de calibrage. Un quatrième projet a eu lieu en 2014 dans le cadre d'un projet entrepreneurial portant sur la video-projection sur des surfaces non-uniformes ; une partie de cette étude a été menée au Norwegian Colour and Visual Computing Laboratory à Gjøvik, Norvège.
- *Couleur et brillant de la peau maquillée* : deux projets en 2013 et 2014 avec Chanel SA. Les fabricants de produits cosmétiques s'intéressent à la caractérisation objective de la peau maquillée et à l'optimisation de leurs recettes de formulation, un sujet déjà abondamment étudié [19-21] sans pourtant qu'une solution parvienne à satisfaire totalement les ingénieurs de recherche et développement de ce secteur. Les études menées dans ces projets ont conduit à contrat avec Chanel pour le co-encadrement d'un stage de fin d'études en 2015 sur la mesure des propriétés optiques de la peau [22]. Une poursuite de la collaboration par une thèse est envisagée.
- *Simulateur de rendus textiles* : deux projets en 2013 avec la société Orimono basée à Saint-Etienne, concepteur de solutions textiles pour le packaging. Les professionnels du textile et du packaging sont amenés à produire des prototypes en un temps de plus en plus court. Ils sont

donc à la recherche d'outils de prototypage, virtuels ou réels, leur permettant de pré-visualiser le rendu final de l'objet avant d'aborder les questions relatives aux matières et aux contraintes de fabrication. L'objectif des projets réalisés était de voir si on pouvait, à partir d'échantillons, simuler quel serait leur rendu s'ils étaient tissés avec des fils d'autres couleurs, sans modifier le brillant ni la texture visuelle (Figure 30). Cette démarche originale par rapport à l'état de l'art, où les quelques études que nous avons pu trouver cherchaient à prédire la couleur sans traiter le brillant [23], a donné à une présentation en congrès international [24].

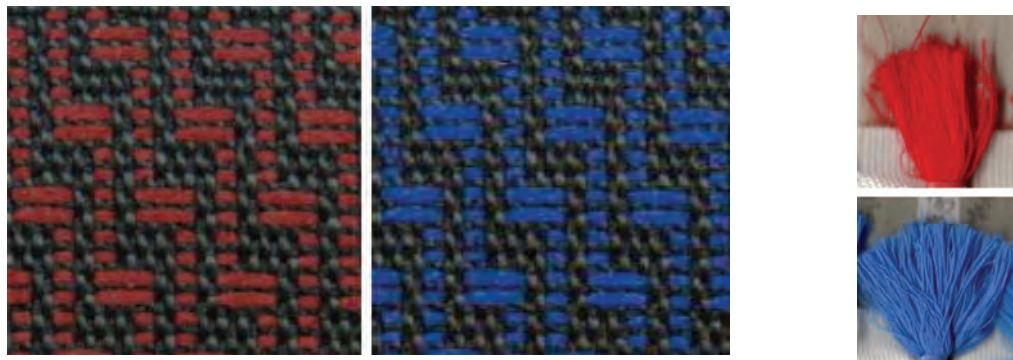


Fig. 30. Simulation du rendu de tissu Jacquard à partir de teintes mesurées par imagerie sur mouchets. En rouge et noir : l'image scannée d'un tissu réel, en bleu et noir : l'image simulée du tissu, à droite : images scannées des mouchets de fils rouge et bleu [24].

- *Mesure de surfaces diffractives* : un projet en 2014 avec la société Silsef basée en Haute Savoie, productrice de surfaces diffractives en polymère. L'étude visait à déterminer si le procédé d'élaboration de ces surfaces se dégrade au cours du temps à partir de mesures macroscopiques. Des dispositifs de mesures spectrales et colorimétriques ont été proposés, avec analyse de leur précision. La possibilité de caractériser des surfaces micro-structurées par des systèmes d'imagerie en couleur ou multispectraux, une sorte de « métrologie du pauvre », m'intéresse particulièrement car elle correspond à un besoin dans les entreprises qui n'ont souvent qu'un accès restreint aux plateformes de microscopie. Elle est théoriquement possible chaque fois qu'on peut établir une relation bijective entre les paramètres microscopiques de la structure et les grandeurs macroscopiques mesurées, la question portant ensuite sur la précision de ces méthodes.¹

De nombreux autres projets, une trentaine environ chaque année mais cette fois sans partenaire extérieur ou très rarement, sont menés dans le cadre de mon cours de master 2 « Optical models for colored surfaces » à l'Université Jean Monnet. Les étudiants ont le choix de traiter un sujet de modélisation optique pour des surfaces revêtues ou un sujet de tramage numérique d'images.

La métrologie optique des surfaces pose quelques questions qui méritent d'être étudiées concernant notamment l'influence de l'éclairage. Le brillant induit par la surface d'un matériau diffusant diffère selon que la lumière incidente est directionnelle ou diffuse. La

¹ Une étude avec le CEA-Liten sur la mesure par la couleur de l'orientation de réseaux de micro-billes vient d'être soumise à *ACS Applied Materials & Interfaces*.

longueur de cohérence de la source lumineuse, à l'heure où des sources traditionnelles incohérentes comme l'halogène tendent à être remplacées par des LED, plus cohérentes, peut entraîner des interférences si la surface est stratifiée ou du scintillement si la surface est rugueuse, sans qu'on sache dire aujourd'hui les variations de couleur perçue qu'ils génèrent. Ces questions intéressent directement les programmes de protection du patrimoine culturel tels que le programme européen COST "Colour and Space in Cultural Heritage" (COSCH), dans lesquels la numérisation tient une place centrale. Mis à part ces quelques questions, la métrologie optique est difficile à valoriser d'un point de vue académique. Elle est cependant indispensable pour répondre aux besoins immédiats formulés par nos partenaires, avant de conduire éventuellement à des projets plus ambitieux et originaux par rapport à l'état de l'art. Le fait d'associer ces activités peu valorisables à une démarche de formation – d'étudiants et de professionnels – est un mode d'interaction enseignement-recherche-industrie plein d'avantages. L'évolution de cette démarche doit tendre vers une véritable offre de formation continue afin de diffuser dans l'industrie les principes de base de la coloration de la lumière par la matière.

5.3. Un lien entre les supports imprimés et les tissus biologiques ?

Nous venons d'évoquer l'étude de la peau humaine dans le contexte de la cosmétique, donc à des fins plutôt esthétiques, mais l'étude des propriétés optiques de la peau, et plus généralement celles des tissus biologiques, intéresse le domaine médical pour le diagnostic de pathologies cutanées. J'ai ainsi participé aux côtés de Newton Technologies, concepteur de systèmes de mesure d'apparence basé à Lyon, au développement d'un analyseur d'images multispectrales de la peau où un modèle spectral à deux flux permet de calculer plusieurs paramètres physiques en chaque pixel et donc de les cartographier dans la zone imagée : fraction volumique sanguine, taux d'oxygénation, épaisseur d'épiderme, concentrations en mélanine et bilirubine [25]. Un contact récent avec un médecin du centre hospitalier universitaire de Saint-Etienne nous a appris que le diagnostic des cancers se fait encore majoritairement à l'œil nu à partir de symptômes caractérisés par la couleur et le brillant. L'imagerie pourrait considérablement le faciliter [26], surtout à l'heure où la télémédecine est en pleine expansion. Un projet d'étudiant à l'automne 2015 va initier cette collaboration.

Une autre voie de recherche plus ambitieuse s'est ouverte dans le cadre de la thèse de Laure Alston au laboratoire Créatis à Lyon, spécialisé dans l'imagerie médicale. Le sujet de cette thèse, que je co-encadre depuis octobre 2014, porte sur l'assistance par imagerie aux opérations neurochirurgicales du glioblastome – une tumeur cérébrale agressive dont la survie n'est que de quelques mois avec les meilleurs traitements. L'objectif premier du dispositif proposé est de localiser précisément le gliome pendant l'opération, l'ouverture de la boîte crânienne entraînant une déformation du cerveau par rapport au repérage préalablement effectué par IRM. Une réponse quantitative quant au nombre de cellules présentes en un point donné est attendue. La localisation des cellules cancéreuses est rendue possible par l'accumulation de protoporphyrine IX dont la signature spectrale de fluorescence sous excitation UV est détectable [27]. L'émission lumineuse par fluorescence se fait dans deux bandes spectrales étroites autour de 630 nm, la proportion de flux émis dans chaque bande

dépend de la longueur d'onde d'excitation, ce qui améliore les capacités de détection de la molécule. Ma contribution à ces recherches porte sur le modèle de diffusion lumineuse qui permet de déduire la concentration en cellule cancéreuses du spectre mesuré. La présence de micro-taches sanguines confère au tissu cérébral des propriétés optiques analogues à celles d'imprimés en demi-tons. L'objectif secondaire de cette thèse est de localiser les aires fonctionnelles à préserver, grâce à une caméra en couleur. Des parties du corps et des fonctions comme la parole sont stimulées pendant l'opération, et il en résulte un afflux sanguin dans les zones cérébrales associées, donc un changement de couleur qu'une analyse colorimétrique de l'image doit permettre de détecter. Notons que le cerveau bouge sous l'effet de la pulsation cardiaque. Un recalage d'image en temps réel est nécessaire, qui a coûté une partie de la première année de thèse. Pour garantir une localisation en temps réel des zones d'intérêt, il est nécessaire que le modèle spectro-colorimétrique soit très efficace et facile à inverser. La démarche que j'ai longuement décrite pour les imprimés semble donc appropriée. C'est ce que les deux années de thèse restantes doivent parvenir à prouver.

5.4. Objets et images d'objets

Pour mesurer l'apparence et la transmettre, l'imagerie numérique tient une place de choix. Le progrès des technologies d'acquisition d'image permet d'étendre l'imagerie à trois canaux rouge, vert, bleu (images RGB) à un nombre de canaux plus élevé correspondant à des plages de longueurs d'onde plus étroites (images multispectrales ou hyperspectrales). La géométrie d'acquisition plane s'étend aussi à l'acquisition en trois dimensions (images 3D). Ces évolutions ne sont pas au cœur de ma spécialité de recherche, mais elles la concernent en tant qu'outils. Par exemple, une caméra multispectrale peut acquérir en une fois les facteurs spectraux de réflexion de patches colorés dont nous avons besoin pour le calibrage de nos modèles : il suffirait alors de prendre l'image de la page où les patches sont imprimés, plutôt que mesurer ces patches un à un avec un spectrophotomètre. Elles permettent aussi de mesurer la variation surfacique du facteur spectral de réflexion à une échelle mésoscopique, voire microscopique selon l'objectif, plutôt que de mesurer une valeur spectrale moyenne sur une zone étendue avec les spectrophotomètres. Mais ces caméras sont encore chères et ont un temps d'exposition long, ce qui restreint leur utilisation à des objets figés. Si certains modèles commerciaux arrivent sur le marché, elles restent majoritairement des instruments de laboratoire.

Dans le sens opposé, on entend parler depuis quelques années de méthodes permettant de mesurer des facteurs spectraux de réflexion de surfaces avec une simple caméra RGB ou un téléphone intelligent [28]. Le sujet est brûlant, et on comprend son intérêt : il permettrait à chacun de disposer d'un spectro-photomètre dans sa poche, et on peut imaginer améliorer de manière fantastique la gestion des couleurs d'images d'objets, notamment pour les images diffusées par internet. La vente en ligne, par exemple, est directement concernée par ces problématiques de restitution réaliste de « la » couleur d'un produit sur un écran numérique. L'impression à la demande par internet est concernée de la même manière. En architecture et en décoration d'intérieur, les logiciels de simulation photométriques pour l'architecture sont en plein essor [29] et la simulation du rendu ne se fera bientôt plus dans le cabinet d'architecte

ou dans le studio de design, mais en boutique ou chez soi avec son téléphone intelligent. Certaines méthodes – colorimétriques, pas encore spectrales – ont déjà été proposées moyennant de positionner dans le champ de l'image un petit nuancier multicolore [30-31].

Le principe de la mesure spectrale par téléphone intelligent repose sur la réponse spectrale des trois capteurs rouge, vert, bleu de la caméra et sur les densités spectrales des trois LED rouge verte et bleu de l'écran. Il est difficile à l'heure où je rédige ces lignes de trouver des informations fiables sur la précision de ces méthodes, dont la résolution spectrale est forcément limitée : on peut s'attendre au mieux à neuf bandes spectrales. Mais cela peut suffire pour analyser une gamme de surfaces dont la dimensionnalité spectrale est petite, comme c'est le cas en impression où le nombre de colorants est limité. De plus, avec les performances des méthodes informatiques actuelles, on peut espérer retrouver dans des clichés des informations physiques exploitables moyennant quelques hypothèses raisonnables. Un travail collaboratif entre les chercheurs spécialisés dans l'apprentissage automatique et dans l'imagerie couleur au sein du Laboratoire Hubert Curien a déjà obtenu des résultats pour estimer la couleur d'objets dans des images non-calibrées colorimétriquement ou estimer l'illuminant d'une scène photographiée [32]. Cette démarche collaborative se poursuit avec une thèse démarrant en septembre 2015, dont je participerai à l'encadrement, au sujet de la simulation physico-réaliste des inter-réflexions entre objets dans une image non calibrée.

Le sujet des inter-réflexions est étudié depuis longtemps en synthèse d'image pour rendre compte de l'influence des variations de couleurs sur un objet dues à la présence d'un autre objet coloré dans la scène [33-35]. Il pose notamment problème en infographie pour modifier virtuellement la couleur d'un objet dans une scène photographiée – une démarche utile au prototypage virtuel d'objets dans une scène réaliste ou à la simulation d'aménagements d'intérieurs, qui rejoint ce que nous avons cherché à faire pour les textiles. Le point de départ de notre projet est la méthode récemment proposée par Joost van de Weije de l'Universitat Autònoma de Barcelona en Espagne, lequel est aussi associé à l'encadrement de la thèse [36]. Cette méthode s'applique à des objets identifiés dans une image non-calibrée, dont chaque pixel se voit attribuer deux composantes, l'une chromatique, l'autre associée au brillant généralement achromatique. La présence d'inter-réflexions entre objets affecte ces deux composantes, modifiées à partir d'un calcul sur les valeurs RGB des pixels de l'image. Le point faible de la méthode est le calcul colorimétrique qui ne repose que sur des valeurs RGB. S'il est physiquement réaliste de multiplier la densité spectrale d'un illuminant par les facteurs spectraux de réflexion des objets pour modéliser la variation spectrale d'un rayon lumineux ayant frappé successivement les objets, il est exclu que la multiplication de leurs valeurs RGB successive soit réaliste, sauf dans des cas très spécifiques. Elle risque au contraire de générer des fausses couleurs. Ce sont ces facteurs spectraux de réflexion qu'il s'agit de retrouver à partir d'une analyse judicieuse de l'image RGB non calibrée et de tous les indices qu'on peut y détecter.

5.5. Conclusion

Après quinze années passées à étudier les surfaces imprimées, je me fixe maintenant un double objectif sur ce thème : exploiter le potentiel d'innovation des connaissances acquises –

je cultive l'espoir de voir un jour une vitrine ou une enseigne changeant d'affichage entre le jour et la nuit – et aborder le sujet de l'impression en volume, en y apportant des contributions originales au niveau international. J'ai aussi formulé mon intérêt pour d'autres types de surfaces, et plusieurs opportunités se présentent déjà avec le textile et la peau. J'espère pouvoir interagir bientôt avec le domaine de la céramique : l'invitation en novembre 2014 par le Pôle Européen de la Céramique à Limoges à donner un séminaire sur l'apparence des surfaces dans une journée thématique sur la céramique et le luxe est un signe encourageant. Le contexte industriel que j'ai tenté de décrire en introduction semble évoluer en faveur d'une interaction recherche-industrie dynamique, sur des problèmes dont l'intérêt scientifique est suffisamment marqué pour maintenir un niveau de recherche académique satisfaisant. Compte tenu de la complexité des mécanismes de la vision humaine face à la demande croissante de l'industrie en solutions de caractérisation ou de simulation de rendu compatibles avec l'univers numérique, je ne vois pas d'alternative aujourd'hui à l'imagerie pour répondre rapidement à cette demande. Les imprimés comme les autres types d'objets sont concernés. C'est la raison pour laquelle je souhaite contribuer aux progrès des sciences de l'image dans cette voie, avec mes compétences d'opticiens avant tout. Ma participation au projet sur les inter-réflexions entre objets s'inscrit dans cette démarche, et représente le premier projet d'envergure en ce sens. Le projet est ambitieux, mais toute avancée sur des configurations simples représentera déjà un grand pas.

5.6. Références

1. B. Maheu, J.N. Le Toulouzan, G. Gouesbet, "Four-flux models to solve the scattering transfer equation in terms of Lorenz-Mie parameters," *Appl. Opt.* **23**, 3353-3362 (1984).
2. B. Maheu, G. Gouesbet, "Four-flux models to solve the scattering transfer equation. Special cases," *Appl. Opt.* **25**, 1122-1228 (1986).
3. B. Maheu, J.P. Briton, G. Gouesbet, "Four-flux model and a Monte Carlo code: comparisons between two simple and complementary tools for multiple scattering calculations," *Appl. Opt.* **28**, 22-24 (1989).
4. C. Rozé, T. Girasole, G. Gréhan, G. Gouesbet, B. Maheu, "Average crossing parameter and forward scattering ratio values in four-flux model for multiple scattering media," *Opt. Commun.* **194**, 251-263 (2001).
5. C. Rozé, T. Girasole, A.G. Tafforin, "Multilayer four-flux model of scattering, emitting and absorbing media," *Opt. Commun.* **194**, 251-263 (2001).
6. P.S. Mudgett, L.W. Richards, "Multiple scattering calculations for technology," *Appl. Opt.* **10**, 1485-1502 (1971).
7. M. Hébert, P. Emmel, "Two-flux and multiframe matrix models for colored surfaces," in *Handbook of Digital Imaging*, Vol. 2, Ed. Mickael Kriss, Wiley, pp. 1233-1277 (2015).
8. T. Baar, S. Samadzadegan, M. V. Ortiz-Segovia, P. Urban, H. Brettel, "Printing gloss effects in a 2.5D system," *Proc. SPIE* **9018**, Paper 90180M (2014).
9. C. Parraman, "The development of vector based 2.5D print methods for a painting machine," *Proc. SPIE* **8652**, Paper 86520R (2013).
10. M. Lanzetta, E. Sachs, "Improved surface finish in 3D printing using bimodal powder distribution," *Rapid Prototyping Journal* **9**, 157-166 (2003).
11. C. Parraman, "The visual appearance and surface texture of materials according to the old masters," *Proc. SPIE* **9018**, Paper 90180H (2014).
12. C. A. Arikan, A. Brunton, T. M. Tanksale, P. Urban, "Color-managed 3D printing with highly translucent printing materials," *Proc. SPIE* **9398**, Paper 93980S (2015).
13. B. Krassenstein, "Amazingly Realistic Color InkJet 3D Printing Method Created Using Sophisticated Algorithms," *3DPrint.com*, <http://3dprint.com/74848/3d-print-color>, (June 19, 2015).

14. Thomasine Giesecke, site internet : <http://www.thomasinegiesecke.com>.
15. M. Mikula, M. Ceppan and K. Vasko, Gloss and Goniochromimetry of Printed Materials, *Color Res. Appl.* **28**, 335–342 (2003).
16. S. Ershov, K. Kolchin, K. Myszkowski, “Rendering pearlescent appearance based on paint-composition modeling,” *Computer Graphics Forum* **20**, 221–238 (2001).
17. S. Ershov, R. Đuriković, K. Kolchin, K. Myszkowski, “Reverse engineering approach to appearance-based design of metallic and pearlescent paints,” *The Visual Computer* **20**, 586–600 (2004).
18. Róbert Smetana, *Overview of reflectance models focused on car paint simulation*, Bachelor’s Thesis, Comenius University of Bratislava, Slovakia (2008).
19. S. K. Choi, Y. J. Yang, K. N. Kim, J. Choi, Y. J. Choi, S. H. Han, “A Study of the Optical Properties of Cosmetics Measured by Polarized Light Goniophotometry,” *J. Opt. Soc. Korea* **16**, 36–41 (2012).
20. N. Ikeda, K. Miyashita, R. Hikima, S. Tominaga, “Reflection Measurement and Visual Evaluation of the Luminosity of Skin Coated with Powder Foundation,” *Color Res. Appl.* **39**, 45–55 (2014).
21. M. Doi, R. Ohtsuki, S. Tominaga, “Spectral estimation of human skin color using the Kubelka-Munk theory,” *Proc. SPIE* **6062**, Paper 606204 (2006).
22. M. Hébert, A. Cazier, A. Borocco, C. Espitalier, “Etude du brillant de fonds de teint pour Chanel,” Rapport de recherche pour le groupe Chanel SA, Février 2014.
23. K. Mathur, Color prediction model for jacquard tapestry woven fabrics, PhD Dissertation, North Carolina State University, 2006.
24. M. Hébert, L. Henckens, J. Barbier, L. Leboulleux, M. Page, L. Roujasb, A. Cazier, “Changing the color of textiles with realistic visual rendering,” *Proc. SPIE* **9398**, Measuring, modeling, and reproducing material appearance (San Francisco, USA, February 10, 2015).
25. P. Séroul, M. Hébert, M. Jomier, “Hyper-spectral imaging system for in-vivo quantification of skin pigments,” *Proc. 28th IFSCC Congress*, pp. 123–132 (Paris, France, 2014).
26. S. L. Jacques, J. C. Ramella-Roman, K. Lee, “Imaging skin pathology with polarized light,” *J Biomed Opt.* **7**, 329–40 (2002).
27. L. Alston, L. Mahieu-Williame, X. Armoiry, D. Meyronet, M. Hébert, D. Rousseau, J. Guyotat, B. Montcel, “Spectroscopic fluorescence measurements as an intraoperative tool for glioma resection,” *Proc. SPIE* **9537**, Paper 9537-74 (2015).
28. R. Slavuj, P. Green, “To develop a method of estimating spectral reflectance from camera RGB values,” *Colour and Visual Computing Symposium (CVCS)* 1–6, 2013.
29. M. Bodart, R. Peñaranda, A. Deneyer, G. Flamant, “Photometry and colorimetry characterisation of materials in daylighting evaluation tools,” *Building and Environment* **43**, 2046–2058 (2008).
30. J. Marguier, N. Bhatti, H. Baker, S. Süstrunk. “A Home Décor expert in your camera,” *Proc. IS&T/SID 17th Color Imaging Conference* (2009).
31. J. Marguier, *Exploiting redundancy in color images*, PhD Dissertation, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse (2009).
32. M. Perrot, A. Habrard, D. Muselet, M. Sebban, “Modeling Perceptual Color Differences by Local Metric Learning,” *Lecture Notes in Computer Science* **8693**, 96–111 (2014).
33. M. S. Drew, B. V. Funt, “Variational approach to interreflection in color images,” *J. Opt. Soc. Am. A* **9**, 1255–1265 (1992).
34. B. V. Funt, M. S. Drew, J. Ho, “Color constancy from mutual reflection,” *International Journal of Computer Vision* **6**, 5–24 (1991).
35. S. Tominaga, T. Okayama, “A method for analyzing color images containing highlight and interreflection effects,” *Systems and Computers in Japan* **28**, 8–18 (1997).
36. S. Beigpour, J. van de Weijer, “Object recoloring based on intrinsic image estimation,” *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 327 - 334 (2011).

Chapitre 6.

Conclusion

En conclusion générale de ce mémoire, je souhaite revenir sur mon parcours professionnel d'un point de vue plus personnel, depuis mes études en sciences de l'image jusqu'aux fonctions que j'occupe aujourd'hui dans la communauté de l'optique. Si je milite pour la prise en compte de la lumière dans les technologies de la couleur et de l'apparence, c'est que j'en ai été moi-même très vite convaincu lorsque j'ai commencé à explorer ce sujet, alors que cette démarche ne me semble pas majoritaire. C'est donc en autodidacte que je me suis formé à la radiométrie, plus précisément à celle dédiée aux surfaces. J'ai le plaisir de constater aujourd'hui que le chapitre d'ouvrage sur les modèles radiométriques élémentaires auquel j'ai participé¹ reçoit un écho positif.

Je dois ce cheminement à des environnements de travail exceptionnels. Je remercie à nouveau Roger Hersch de m'avoir laissé le temps de divaguer dans les diverses méthodes mathématiques conduisant parfois à des équations déjà connues, et ce avec la complicité de Jean-Marie Becker que j'ai côtoyé de près à CPE-Lyon durant ma période doctorale. Ces éclairages différents sur les équations me permettent maintenant de mettre derrière celles que j'utilise des années de pratique et de réflexion, et d'en saisir les subtilités et le potentiel pour aborder des problèmes inédits. Pendant plusieurs années, je suis resté concentré sur cet objectif de prédire les propriétés spectrales de supports colorés, en essayant de comprendre la signification de tel ou tel paramètre ou en essayant de repousser les limites de ce qu'on sait prédire, mais sans chercher à valoriser ces modèles directs à travers des applications concrètes. Je me suis certes imprégné de l'excellence de la démarche scientifique du Laboratoire de Systèmes Périphérique dirigé par Roger Hersch, qui couvre aussi bien le développement de modèles prédictifs de rendu couleur de surfaces que la réalisation de prototypes convaincants et de solutions graphiques sécurisées. Mais je ne me suis pas investi dans cette démarche complète avant mon arrivée au Laboratoire Hubert Curien à Saint-Etienne. C'est là que j'ai eu à nouveau la chance de rencontrer des personnes en France se montrant ouvertes aux problématiques des surfaces imprimées, en particulier Pierre Chavel de l'Institut d'Optique Graduate School, et Thierry Fournel de l'Université Jean Monnet. Mon accession au poste que j'occupe aujourd'hui m'a encre dans un environnement d'opticiens dont Thierry Lépine, Jean-Jacques Greffet, Henry Benisty, Mondher Besbes, Jean-Paul Hugonin, et de spécialistes de l'imagerie couleur dont Alain Trémeau, Damien Muselet. L'interaction avec ces personnes et avec les étudiants de l'Institut d'Optique conduit à un

¹ *Handbook of Digital Imaging*, Wiley, Chapitre 26. Ce chapitre rédigé avec Roger Hersch et Patrick Emmel – deux chercheurs convaincus de l'approche optique pour la reproduction des couleurs qui m'ont incité à m'engager dans cette voie – a été sélectionné parmi la cinquantaine de chapitres de cet ouvrage en trois volumes comme chapitre témoins, en libre accès sur le site de la maison d'édition.

bouillonnement d'idées où des compétences complémentaires se fédèrent pour donner lieu à des projets originaux comme celui sur la cryptographie visuelle en couleur, celui sur le bronzage de couches d'encres ou celui qui va démarrer sur les inter-réflexions lumineuses entre objets. Le caractère transversal de l'analyse macroscopique des surfaces à fonctionnalité visuelle est, je crois, ce qui a contribué à installer ce thème dans le paysage scientifique du Laboratoire Hubert Curien à travers la petite équipe « Modèles Macroscopiques d'Images de Surfaces » (MMIS), nouvellement créée et dont la responsabilité m'est désormais confiée. Cette reconnaissance est à apprécier au regard de l'intérêt modéré que ce sujet suscite généralement, dont on m'a prévenu qu'il n'était pas très propice à décrocher des financements publics.

Je constate que les articles théoriques ont un impact à court terme assez faible – même si je croise encore assez souvent des personnes qui les ont lus, parmi lesquelles figurent autant d'ingénieurs de l'industrie que de chercheurs académiques. Au contraire, les spécimens multi-vues imprimés en recto-verso ont suscité l'intérêt immédiat de notre partenaire industriel Arjowiggins Security, qui nous accompagne dans le financement de ces recherches. Serge Mazauric présentera pour la première fois ces spécimens en congrès international, à la 23^{ième} édition de la Color Imaging Conference en novembre 2015, et le retour par le comité de programme de la conférence est déjà très enthousiaste (l'exposé est d'ailleurs planifié en session d'ouverture). Il ne s'agit pas de regretter d'avoir privilégié jusqu'ici les travaux théoriques destinés aux revues au détriment de réalisations plus « vendeuses » : ils sont un pré-requis indispensable aux potentielles applications. Mais ils ne gagnent pas à rester confidentiels, et je me suis récemment aperçu que j'avais trop peu investi les rencontres internationales pour offrir une visibilité de mes travaux et pour mieux comprendre comment ils peuvent s'inscrire dans le panorama scientifique actuel. Ces rendez-vous internationaux sont d'autant plus importants que les chercheurs s'intéressant à la reproduction des couleurs s'y investissent beaucoup : la majorité de leurs publications paraît dans des actes de conférences. C'est pourquoi j'ai décidé de participer à l'organisation de la conférence annuelle Measuring, Modeling, and Reproducing Material Appearance au sein du symposium Electronic Imaging.

Si j'ai insisté en introduction sur le contexte industriel dans lequel s'inscrivent mes recherches, c'est parce que ces cinq dernières années ont été pour moi un apprentissage sur la manière d'interagir avec l'industrie. Là encore, il m'aura fallu du temps pour comprendre que les théories physiques sont trop abstraites pour le secteur industriel concerné par l'apparence de produits. Dire ce qu'on sait modéliser, mesurer, prédire, n'évoque rien à qui n'est pas préparé à entendre ce langage. Seul des démonstrateurs, des prototypes, des dispositifs de mesure, sont à même de susciter assez d'intérêt pour amorcer une collaboration recherche-industrie, même lorsqu'un besoin émane du partenaire industriel. Pour cette raison, les projets conduits avec les étudiants de l'Institut d'Optique, dont j'ai déjà vanté les avantages, sont précieux : ils permettent de dialoguer ensuite sur la base de réalisations concrètes. Mais ils risquent de devenir insuffisants. Si on peut compter sur eux pour une preuve de concept, on ne peut aller jusqu'à la réalisation d'un démonstrateur abouti. Il nous manque pour cela les compétences de développeurs, de techniciens et de designers. Parvenir à réunir ces

compétences est un des chantiers auquel nous commençons à réfléchir avec les autres membres de l'équipe MMIS.

L'ouverture thématique qui se dessine à travers les collaborations en cours, en interne au Laboratoire Hubert Curien ou avec des partenaires universitaires de l'imagerie médicale, est enthousiasmante car elle peut offrir des débouchés inattendus aux modèles initialement dédiés aux surfaces imprimées, tout en générant de nouvelles idées. Il convient de laisser libre cours à ces opportunités ; mais il convient aussi, pour une petite équipe comme la nôtre, de définir des priorités – ou de développer l'équipe, ce qui n'est pas le plus simple à envisager. Définir des priorités n'est pas facile non plus, et il faut pourtant s'y risquer : il faut trouver le bon compromis entre entretenir un domaine de spécialité où l'on est a priori le plus visible et le plus efficace, et l'enrichir par l'interaction avec des domaines connexes, ce qui demande un certain investissement en temps. En dehors de la question des opportunités de financement, qui entrent évidemment aussi en ligne de compte, il me paraît souhaitable de maintenir notre spécificité sur la modélisation optique pour les surfaces imprimées, à l'heure où l'impression numérique est en plein essor et où le “*computational printing*” (voir annexe A, p. 85) gagne en notoriété académique. La collaboration avec les domaines de la santé est également intéressante tant que nos compétences représentent un apport appréciable comme cela promet d'être le cas pour la thèse de Laure Alston avec le Laboratoire Creatis de Lyon. L'étude du textile paraît pour l'instant plus aventureuse : il est tentant de chercher à étoffer un état de l'art quasiment vierge concernant la prédiction du rendu visuel de tissus, et le défi scientifique posé par ces structures volumiques, fibreuses et anisotropes, est encore plus piquant à relever que celui posé par les surfaces imprimées. Mais il est difficile de prévoir si les résultats auxquels on peut prétendre se montreront à la hauteur des efforts qu'ils risquent de représenter. C'est donc une voie dans laquelle je m'engage doucement ; l'avenir nous dira où elle conduit.

Je souhaite, pour clore ce mémoire, recentrer mes réflexions sur son objet premier : l'encadrement de jeunes chercheurs. J'ai jusqu'à présent eu un grand plaisir à travailler avec les doctorants et post-doctorants que j'ai eu l'occasion de superviser, à essayer de leur faire part de mon expérience, à stimuler mutuellement notre imagination, confronter nos points de vues, partager les succès et les difficultés. Je regrette seulement que la durée des contrats doctoraux soit trop courte pour laisser une chance aux doctorants de maîtriser tout à fait leur sujet. L'obligation de résultats en trois années oblige quasiment d'imposer aux candidats des axes précis de recherche définis en amont de leur thèse plutôt que de les laisser explorer leur problématique et proposer des contributions issues de leur propre inspiration. De même, l'encadrant est souvent contraint d'accélérer le travail de rédaction des publications en intervenant beaucoup lui-même, au lieu de laisser aux doctorants le temps de parfaire leur démarche de production scientifique, ce qu'une bonne formation doctorale devrait permettre. Ce constat me permet de réaliser la chance que j'ai eue, inscrit comme doctorant dans un établissement helvétique, d'avoir pu bénéficier de cinquante-deux mois de thèse au lieu des trente-six accordés en France : une demi-année supplémentaire donnerait aux doctorants un peu plus de temps pour définir leur propre démarche scientifique et intellectuelle.

Il reste à évoquer la question la plus difficile concernant les jeunes chercheurs : celle de leur recrutement. Pour une ville de province qui n'a pas la chance d'aimer les étudiants autant que les grandes métropoles, recruter de jeunes talents est un exercice difficile qui demande une énergie considérable. Il semble plus difficile encore d'attirer les étudiants opticiens sur des sujets comme l'apparence de produits d'usage courant – ces étudiants sont très courtisés par l'industrie des systèmes optiques et photoniques. On doit aussi craindre que l'accès de plus en plus restrictif à nos laboratoires des étudiants de certaines nationalités ne permette plus de pallier le manque de candidats européens. Ainsi, aux lignes que j'ai consacrées plus haut à l'importance d'une bonne stratégie de communication pour convaincre la communauté scientifique et l'industrie de l'intérêt de nos activités de modélisation optique, je me permets d'en ajouter une pour dire que cette stratégie doit également viser les étudiants. Notre capacité à résoudre les défis scientifiques de demain passe d'abord par notre capacité à en intéresser suffisamment parmi eux aujourd'hui pour espérer former une communauté de chercheurs académiques et industriels. Cet enjeu nécessite pour nous qui définissons les sujets de thèse de garantir un impact pour la société assez fort et intelligible pour que les étudiants puissent se projeter dans ces thématiques, sentir le désir d'y contribuer, et avoir l'assurance d'une opportunité d'emploi à l'issue de leur thèse. La bienveillance de mes aînés dont j'ai tant bénéficié, y compris dans ces aspects-là, est pour moi une ligne de conduite admirable que je souhaite être toujours en mesure de pouvoir suivre.

Annexe A – Numérique et numérique...

A l'heure où l'ère du « tout numérique » est annoncée, de nombreux concepts évoluent de leur état maintenant qualifié d'« analogique » vers leur version « numérique ». Ceci vaut pour les systèmes de production, les systèmes d'acquisition d'image, l'impression ou les modèles scientifiques. Afin de ne pas encombrer le corps du mémoire avec ces considérations, que j'estime néanmoins utiles pour se repérer, j'ai jugé préférable de les regrouper dans cette annexe, en me limitant aux usages du terme « numérique » auxquels mes travaux font référence. Par ailleurs, dans ce texte rédigé en français, j'ai essayé d'éviter autant que possible le recours à la terminologie anglaise qui s'est pourtant imposée dans le domaine scientifique et technique, en particulier en ce qui concerne les nouvelles technologies numériques. Ainsi, l'expression *gamut mapping* est beaucoup plus répandue que son équivalent français « module de correspondance de couleurs ». Je me permets donc d'introduire dans ce petit lexique informel quelques termes anglais.

A.1. L'image numérique – acquisition et restitution

Le concept d'*image* recouvre deux aspects : l'acquisition de l'image et sa restitution. L'un et l'autre sont concernés par le passage de techniques analogiques à des techniques numériques.

Concernant l'acquisition, les techniques analogiques comme la photographie argentique (*analog photography* ou *film photography*) et la caméra à pellicule (*film camera*) ont quasiment disparu au profit des scanners et des appareils photographiques ou cameras numériques (*digital cameras*). Au-delà des procédés eux-mêmes, une différence notable entre les images prises avec des instruments analogiques et celles prises avec des instruments numériques est le fait que les premières sont continues alors que les secondes sont discrètes, c'est-à-dire pixellisées.

Concernant la restitution des images, en dehors des techniques picturales telles la peinture ou la gravure qui ne sont pas issues d'une acquisition, on peut distinguer deux grandes manières de la réaliser : l'affichage par émission lumineuse, ou le tirage par coloration d'un support réfléchissant, souvent du papier, ou plus rarement un support transparent pour la projection. Dans le cas des systèmes à émission lumineuse, le projecteur de diapositives et le projecteur de cinéma à pellicule ont eux aussi pratiquement disparu au profit des écrans et des vidéoprojecteurs. Comme pour l'acquisition d'images, les techniques analogiques affichent des images continues quand les techniques numériques affichent des images pixellisées.

Dans le cas des tirages, le tirage photographique argentique en laboratoire par insolation directe du papier photosensible à travers le négatif (*photographic printing*) n'est plus utilisé que par les amateurs ou certains artistes. Les nouvelles techniques de tirage reposent soit sur des procédés analogiques pilotés par un système numérique (c'est-à-dire par un ordinateur, nécessaire à la lecture des images numériques), soit sur un système d'*impression numérique* (*digital printing*), par exemple une imprimante jet d'encre.

L'imagerie numérique en couleur (*digital color imaging*) est devenue une discipline scientifique qui vise à étudier l'acquisition, le traitement, la restitution ou la synthèse d'images numériques. On parle également de *computational imaging*. La démarche de produire des images imprimées grâce à des programmes et des techniques numériques s'assimile maintenant à une forme de synthèse d'image auquel est attribué le concept anglais *computational printing*, sans équivalent en français à ce jour.

A.2. L'impression numérique

L'impression numérique (*digital printing*), définie dans la section 1.3, désigne les technologies commandées par un pilote d'impression (*driver*), capables de déposer directement les encres sur le support sans recourir à un support transitionnel où l'image originale a été préalablement retranscrite. Les technologies les plus connues sont le jet d'encre (*inkjet*) et les imprimantes laser (*electrophotography*). Ce sont celles que nous utilisons dans les expériences rapportées ici. Les procédés de marquage par laser décrites dans le Chapitre 4 peuvent aussi entrer dans cette catégorie. L'impression numérique s'oppose à l'impression analogique qui, elle, a besoin de retranscrire l'image originale sur un support intermédiaire. On peut citer la sérigraphie (*silk-screen printing*) basée sur des pochoirs (originellement des écrans de soie enduits de cire, d'où le nom de la technique), et la technique offset, utilisée pour l'impression à grand tirage. Cette dernière, dans sa version analogique, utilise une plaque (la plaque offset, *offset plate*) revêtue d'enduits hydrophiles et hydrophobes répartis selon l'image à imprimer, sur lesquels se déposent respectivement une pellicule d'eau et l'encre de nature grasse. Il existe maintenant des technologies offset aussi qualifiées de numériques, où la plaque offset traditionnelle est remplacée par une plaque gravée selon un procédé piloté par ordinateur (principe du *computer-to-plate*). Ces techniques restent néanmoins dans la catégorie de l'impression analogique selon la définition donnée plus haut car il est nécessaire de graver un support intermédiaire pour chaque image, de même qu'il faut préparer le pochoir en sérigraphie.

Contrairement à l'acquisition et l'affichage des images, les procédés analogiques ne produisent pas nécessairement des images continues, ni les procédés numériques des images discrètes, au contraire. En sérigraphie traditionnelle, l'écran de soie formait une trame de « pixels encrables ». Cette trame de pixels encrables est encore présente dans les systèmes jet d'encre et laser. La technique offset traditionnelle permettait de déposer les encres selon des formes continues. Les guilloses des billets de banque, dessinées à la main, sont d'ailleurs des lignes continues imprimées en taille douce (*intaglio*). Cependant, les techniques traditionnelles d'impression reposaient sur le principe du tout ou rien, ce qui nécessitait de recourir à une étape de tramage (*halftoning*) pour générer des demi-tons. Avec les techniques numériques d'aujourd'hui, la trame de points tend à laisser place à des textures visuelles plus homogènes, permises par exemple par l'impression par transfert thermique où la quantité d'encre transférée est ajustable, ou par les derniers modèles d'imprimantes jet d'encre professionnelles qui pulvérisent des gouttelettes de plus en plus fines en quantité également ajustable.

A.3. Modèles physiques, modèles numériques

Si dans ce qui précède « *numérique* » se traduit en anglais « *digital* », son acception en mathématiques est différente : l'*analyse numérique* se traduit *numerical analysis*. Les modèles analytiques reposent sur des équations littérales avant de passer à leur évaluation numérique (*numerical evaluation*).

En revanche, les méthodes numériques de gestion des couleurs se traduisent *digital color management*. Elles sont en fait basées sur un traitement informatique de données dont le sens physique n'est pas nécessairement exploité. Selon la même idée, l'analyse en composantes principales (ACP) d'une base de données de spectres mesurés peut être qualifiée de méthode numérique : les composantes principales sont des objets mathématiques contenant intrinsèquement l'information physique des grandeurs mesurées mais sans que celle-ci paraisse de manière évidente. Les composantes principales, qui ont le même format que les spectres mesurés (c'est-à-dire le même nombre d'éléments correspondant au nombre de bandes spectrales), peuvent avoir des allures quelconques ou prendre des valeurs négatives. L'ACP permet de résoudre des problèmes physiques, comme c'est le cas du problème traité dans le § 4.4 où on l'utilise pour calculer les coefficients spectraux d'absorption de pigments « virtuels » à défaut de pouvoir déterminer ceux des pigments réels. Les modèles physiques, au contraire, vont chercher à préserver et exploiter à travers des équations le sens physique des paramètres ou des fonctions calculées, ce qui n'empêche pas l'utilisation d'algorithmes numériques de résolution d'équations.

Annexe B – Production scientifique

La liste des travaux scientifiques indiquée ci-dessous comprend, à la date du 18 janvier 2016 :

- 23 articles en revue internationales à comité de lecture, dont 11 en tant que premier auteur,
- 3 chapitres dans l'ouvrage collectif *Handbook of Digital Imaging* paru en 2015 chez Wiley,
- 16 articles parus dans des actes de conférences internationales, dont 2 présentés sur invitation,
- 5 rapports de recherche,
- 1 brevet,
- 3 ressources en ligne.

B.1. Articles parus dans des revues à comité de lecture

Articles soumis

- [AS1] S. Mazaauric, **M. Hébert**, T. Fournel, "Reflectance-transmittance model for duplex halftone prints with fast calibration in case of homogeneous support," soumis à *Opt. Express*, Juin 2015.
- [AS2] M. Hébert, C. Diss, R. Charrière, J.-M. Becker, O. Dellea, "Particle structure orientation analysis on hexagonal closed packed particle deposits by angular color imaging," soumis à *ACS Applied Materials & Interfaces*, septembre 2015.

Articles parus depuis la soutenance de these

- [A1] L. Simonot, R.D. Hersch, **M. Hébert**, S. Mazaauric, T. Fournel, "Multilayer four-flux matrix model accounting for directional-diffuse light transfers," *Appl. Opt.* **55**, 27-37 (2016).
- [A2] D. Nébouy, M. Hébert, T. Fournel, N. Larina, J.-L. Lesur, "Prediction of the spectral reflectance of laser-generated color prints by combination of an optical model and learning methods," *J. Opt. Soc. Am. A* **32**, 1661–1671 (2015).
- [A3] S. Mazaauric, **M. Hébert**, L. Simonot, T. Fournel, "2-flux transfer matrix model for predicting the reflectance and transmittance of duplex halftone prints," *J. Opt. Soc. Am. A* **31**, 2775–2788 (2014).
- [A4] N. Destouches, J. Martínez, **M. Hébert**, N. Crespo-Monteiro, G. Vitrant, Z. Liu, A. Trémeau, F. Vocanson, F. Pigeon, S. Reynaud, Y. Lefkir, "Dichroic colored luster of laser-induced silver nanoparticle gratings buried in dense inorganic films," *J. Opt. Soc. Am. B* **31**, 1–7 (2014).
- [A5] L. Simonot, **M. Hébert**, "Between additive and subtractive color mixings: intermediate mixing models," *J. Opt. Soc. Am. A* **31**, 58–66 (2014).
- [A6] **M. Hébert**, R.D. Hersch, "Review of spectral reflectance prediction models for halftone prints: calibration, prediction and performance," *Color Res. Appl.*, paper 21907 (2014).
- [A7] R. Charrière, **M. Hébert**, A. Trémeau, N. Destouches, "Color calibration of an RGB camera mounted in front of a microscope with strong color distortion," *Appl. Opt.* **52**, 5262–5271 (2013).
- [A8] **M. Hébert**, J. Machizaud, "Spectral reflectance and transmittance of stacks of nonscattering films printed with halftone colors," *J. Opt. Soc. Am. A* **29**, 2498-2508 (2012).

- [A9] J. Machizaud, **M. Hébert**, “Spectral reflectance and transmittance prediction model for stacked transparency and paper both printed with halftone colors,” *J. Opt. Soc. Am. A* **29**, 1537–1548 (2012).
- [A10] **M. Hébert**, R.D. Hersch, “Yule-Nielsen based recto-verso color halftone transmittance prediction model,” *Appl. Opt.* **50**, 519–525 (2011).
- [A11] L. Simonot, **M. Hébert**, D. Dupraz, “Goniocolorimetry: from measurement to representation in the CIELAB color space,” *Col. Res. Appl.* **36**, 169–178 (2011).
- [A12] **M. Hébert**, R.D. Hersch, “Analyzing halftone dot blurring by extended spectral prediction models,” *J. Opt. Soc. Am. A* **27**, 6–12 (2010).
- [A13] F. Rousselle, **M. Hébert**, R.D. Hersch, “Predicting the Reflectance of Paper Dyed with Ink Mixtures by Describing Light Scattering as a Function of Ink Absorbance,” *J. Im. Sci. Technol.* **54** (2010).
- [A14] **M. Hébert**, R.D. Hersch, “Reflectance and transmittance model for recto-verso halftone prints: spectral predictions with multi-ink halftones,” *J. Opt. Soc. Am. A* **26**, 356–364 (2009).
- [A15] R. Hersch, M. Brichon, T. Bugnon, **M. Hébert**, “Deducing Ink Spreading Curves from Reflection Spectra Acquired Within Printed Color Images,” *J. Im. Sci. Technol.* **53**, 1–7 (2009).
- [A16] **M. Hébert**, R.D. Hersch, Lionel Simonot, “Spectral prediction model for piles of nonscattering sheets,” *J. Opt. Soc. Am. A* **25**, 2066–2077 (2008).
- [A17] L. Simonot, **M. Hébert**, Roger D. Hersch, Hélène Garay, “Ray scattering model for spherical transparent particles,” *J. Opt. Soc. Am. A* **25**, 1521–1534 (2008).
- [A18] **M. Hébert**, J.-M. Becker, “Correspondence Between Continuous and Discrete 2-Flux Models for Reflectance and Transmittance of Diffusing Layers,” *J. Opt. A* **10**, 035006 (2008).
- [A19] **M. Hébert**, R.D. Hersch, J.-M. Becker, “Compositional reflectance and transmittance model for multilayer specimens,” *J. Opt. Soc. Am. A* **24**, 2628–2644 (2007).

Articles parus avant la soutenance de thèse

- [A20] **M. Hébert**, R.D. Hersch, “Reflectance and transmittance model for recto-verso halftone prints,” *J. Opt. Soc. Am. A* **23**, 2415–2432 (2006).
- [A21] L. Simonot, **M. Hébert**, R.D. Hersch, “Extension of the Williams-Clapper model to stacked nondiffusing colored coatings with different refractive indices,” *J. Opt. Soc. Am. A* **23**, 1432–1441 (2006).
- [A22] **M. Hébert**, R.D. Hersch, “Extending the Clapper-Yule model to rough printing supports,” *J. Opt. Soc. Am. A* **22**, 1952–1967 (2005).
- [A23] **M. Hébert**, R.D. Hersch, “Classical Print Reflection Models: A Radiometric Approach,” *J. Im. Sci. Technol.* **48**, 363–374 (2004).

B.2. Contributions à des ouvrages collectifs

- [B1] **M. Hébert**, R.D. Hersch, P. Emmel, “Fundamentals of Optics and Radiometry for Color Reproduction,” in *Handbook of Digital Imaging*, Vol. 2, Ed. Mickael Kriss, Wiley, Chapter 26, pp. 1021–1077 (2015).
- [B2] R.D. Hersch, **M. Hébert**, “Base models for color halftone reproduction,” in *Handbook of Digital Imaging*, Vol. 2, Ed. Mickael Kriss, Wiley, Chapter 27, pp. 1079–1132 (2015).
- [B3] **M. Hébert**, P. Emmel, “Two-flux and multiframe matrix models for colored surfaces,” in *Handbook of Digital Imaging*, Vol. 2, Ed. Mickael Kriss, Wiley, Chapter 31, pp. 1233–1277 (2015).

B.3. Actes de congrès internationaux

Papiers invités

- [C1] **M. Hébert**, S. Mazauric, T. Fournel, "Flux transfer model for designing visual effects by halftone printing," Workshop on Information Optics, (Kyoto, Japan, June 4, 2015).
- [C2] **M. Hébert**, D. Nébouy, S. Mazauric, "Color and spectral mixings in printed surfaces," *LNCS 9016*, pp. 3–15, Computational Color Imaging Workshop (Saint-Etienne, March 24, 2015).

Papier accepté

- [C3] **M. Hébert**, S. Mazauric, L. Simonot, "Assessing the capacity of two-flux models to predict the spectral properties of layered materials" Electronic Imaging 2016 (San Francisco, USA, February 14-18, 2016).

Papiers publiés

- [C4] S. Mazauric, **M. Hébert**, T. Fournel, "Model-based design of recto-verso prints displaying different images according to the illuminated face," 5th Color Imaging Conference (Darmstadt, Germany, October 19-23, 2015).
- [C5] J. Martinez, **M. Hébert**, A. Trémeau, N. Crespo-Monteiro, N. Destouches, "Multi-color Properties of Silver Glaze Images Photo-engraved on Glass Plates," 5th Color Imaging Conference (Darmstadt, Germany, October 19-23, 2015).
- [C4] L. Alston, L. Mahieu-William, X. Armoiry, D. Meyronet, **M. Hébert**, D. Rousseau, J. Guyotat, B. Montcel, "Spectroscopic fluorescence measurements as an intraoperative tool for glioma resection," *Proc. OSA/ SPIE 9537*, European Conferences on Biomedical Optics, Paper 9537-74 (Munich, June 23, 2015).
- [C6] **M. Hébert**, M. Mallet, A. Deboos, P. Chavel, D.-F. Kuang, J.-P. Hugonin, M. Besbes, A. Cazier, "Exploring the bronzing effect at the surface of ink layers," *Proc. SPIE 9398*, Measuring, modeling, and reproducing material appearance, Paper 93980U (San Francisco, USA, February 10, 2015).
- [C7] **M. Hébert**, L. Henckens, J. Barbier, L. Leboulleux, M. Page, L. Roujasb, A. Cazier, "Changing the color of textiles with realistic visual rendering," *Proc. SPIE 9398*, Measuring, modeling, and reproducing material appearance, Paper 93980Q (San Francisco, USA, February 10, 2015).
- [C8] J. Martinez, **M. Hébert**, A. Trémeau, "Color calibration of an RGB digital camera for the microscopic observation of highly specular materials," *Proc. SPIE 9398*, Measuring, modeling, and reproducing material appearance, Paper 93980I (San Francisco, USA, February 9, 2015).
- [C9] **M. Hébert**, "Yule-Nielsen effect in halftone prints: graphical analysis method and improvement of the Yule-Nielsen transform," *Proc. SPIE 9015*, Color Imaging XIX: Displaying, Processing, Hardcopy, and Applications, Paper 90150R (San Francisco, USA, February 5, 2014).
- [C10] D. Nebouy, **M. Hébert**, T. Fournel, J.-L. Lesur, "Visual quality of printed surfaces: study of homogeneity," *Proc. SPIE 9016*, Image Quality and System Performance XI, Paper 90160C (San Francisco, USA, February 3, 2014).
- [C11] P. Sérout, **M. Hébert**, M. Jomier, "Hyper-spectral imaging system for in-vivo quantification of skin pigments," Proc. 28th IFSCC Congress, pp. 123-132 (Paris, France, 2014).
- [C12] N. Destouches, G. Vitrant, N. Crespo-Monteiro, Z. Liu, Y. Lefkir, F. Vocanson, **M. Hébert**, A. Trémeau, F. Pigeon, "When light plays with metal nanoparticles in optical waveguides and creates spontaneously active color filters", International High Power Laser Ablation (HPLA), (Santa Fe, CA, USA, 21-25 April 2014).
- [C13] N. Destouches, N. Crespo-Monteiro, T. Epicier, Y. Lefkir, F. Vocanson, S. Reynaud, R. Charrière, **M. Hébert**, "Permanent dichroic coloring of surfaces by laser-induced formation of

- chain-like self-organized silver nanoparticles within crystalline titania films,” *Proc. SPIE* **8609**, Synthesis and Photonics of Nanoscale Materials X, Paper 8609-05 (San Francisco, USA, February 22, 2013).
- [C14] J. Machizaud, **M. Hébert**, “Spectral transmittance model for stacks of transparencies printed with halftone colors,” *Proc. SPIE* **8292**, Color Imaging XVII: Displaying, Processing, Hardcopy, and Applications, Paper 8292-12 (San Francisco, USA, January 24, 2012).
- [C15] **M. Hébert**, R.D. Hersch, “Yule-Nielsen approach for predicting the spectral transmittance of halftone prints,” *Proc. IS&T/SID's 17th Color Imaging Conference*, 155–158 (Albuquerque, USA, November 2009).
- [C16] **M. Hébert**, R.D. Hersch, “Deducing ink-transmittance spectra from reflectance and transmittance measurements of prints,” *Proc. SPIE* **6493**, Color Imaging XII: Displaying, Processing, Hardcopy, and Applications, Paper 6493-14, (San Jose, USA, January 28, 2007).
- [C17] R.D. Hersch, **M. Hébert**, “Interaction between Light, Paper and Color Halftones: Challenges and Modelization Approaches,” *Proc. IS&T CGIV*, 1–7 (Leeds, UK, June 2006).
- [C18] **M. Hébert**, P. Emmel, R.D. Hersch, “A Prediction Model for Reflection on Varnished Metallic Plates,” *Proc. IS&T CGIV*, 453–458 (Poitiers, France, April 2-5, 2002).

B.4. Rapports de recherche

- [R1] **M. Hébert**, L. Simonot, S. Mazauric, “Matrix method to predict the spectral reflectance of stratified surfaces including thick layers and thin films” Université de Poitiers, Université Jean Monnet de Saint-Etienne, CPE-Lyon, Mai 2015. <hal-01155614v1>
- [R2] A. Borocco, P. Guarilloff, **M. Hébert**, R. Clerc, “Review on optical properties of human skin: modeling and measurement,” Rapport de recherche pour le groupe Chanel SA, Mai 2015.
- [R3] **M. Hébert**, A. Cazier, A. Borocco, C. Espitalier, “Etude du brillant de fonds de teint pour Chanel,” Rapport de recherche pour le groupe Chanel SA, Février 2014. <hal-01077439v1>
- [R4] L. Simonot, L. Signac, D. Meneveaux, **M. Hébert**, “Modélisation de la diffusion multiple de la lumière dans un réseau cubique selon une approche discrète,” Université de Poitiers, Université Jean Monnet de Saint-Etienne, 2014.
- [R5] **M. Hébert**, “Photographic quality in printing,” Rapport de recherche pour le projet Euripidès EURO-09-801 “COSEC_ID”, Novembre 2010.

B.5. Brevet

- [B5] T. Fournel, **M. Hébert**, M. Camus, C. Halope, J. Machizaud, Cas 370-FR “Color Matching”, demande PCT n° PCT/FR/2013/052087 du 11/09/13, « Procédé d’authentification d’un élément de sécurité par superposition de n images partagées en couleur et élément de sécurité mettant en œuvre ce procédé ».

B.6. Ressources en ligne sur internet

- [W1] L. Simonot, **M. Hébert**, A. Poudret, *Interactive RGB transparency*, application de simulation colorimétrique, issue de l’article [A5]. <http://rgbtransparency.edel.univ-poitiers.fr>
- [W2] **M. Hébert**, *Optical models for color reproduction*. Cours de master, Institut d’Optique Graduate School. <http://paristech.institutoptique.fr/site.php?id=786&fileid=8554>
- [W3] **M. Hébert**, S. Mazauric, *Multiview recto-verso print*, video de communication scientifique, Youtube, <https://www.youtube.com/watch?v=og46Bw7xlkY>.

Annexe C – Curriculum Vitae

Mathieu Hébert

10 rue Paul Chenavard, 69001 Lyon.

Né le 1^{er} mai 1977 à Nantes (44). 38 ans.

Français. Marié.

C.1. Formation académique

2002 – 2006 **Doctorat** externe à Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Suisse, sous la direction de Roger D. Hersch, accueilli par l’antenne CPE-Lyon du Laboratoire de Traitement du Signal et Instrumentation (LTSI) sous la co-direction de Michel Jourlin et Jean-Marie Becker.

Diplôme délivré le 11 juillet 2006 à l’issue de la soutenance publique, après examen à huis clos par le jury le 14 juin 2006 du mémoire : *Compositional model for predicting multilayer reflectances and transmittances in color reproduction*.

2001 **D.E.A. « Image »** de l’Université Jean Monnet de Saint-Etienne.

Stage au Laboratoire de Systèmes Périphériques (LSP) de l’EPFL, Suisse : *Modèle de BRDF spectrale pour les imprimés en demi-ton sur supports métalliques*.

1995 – 2001 **Diplôme d’ingénieur** de l’Ecole Supérieure de Chimie Physique Electronique de Lyon (CPE-Lyon), filière Electronique-Informatique-Télécom, option Image.

C.2. Carrière

Depuis 2010 **Maître de conférences** (Section CNU 63) à l’Institut d’Optique – Graduate School (IOGS) et au Laboratoire Hubert Curien, Saint-Etienne.

2009 – 2010 (10 mois) **Post-doctorat** au Laboratoire Hubert Curien, Saint-Etienne : *Modèles prédictifs de couleur d’imprimés appliqués à la cryptographie visuelle*.

2006 – 2009 (38 mois) **Post-doctorat** au Laboratoire de Systèmes Périphériques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Suisse : *Modèles de réflexion lumineuse par les couches pigmentaires et les papiers encrés*.

Février 2008 **Qualification** par la CNU, section 30, pour le Muséum national d’histoire naturelle.

Février 2007 **Qualification** par la CNU, section 30, pour les Universités.

2002 – 2006 **Doctorat** à l’EPFL, accueilli par l’antenne CPE-Lyon du Laboratoire Traitement du Signal et Instrumentation (LTSI, St-Etienne).

2002 – 2005 **Enseignant vacataire** à CPE-Lyon en mathématiques, traitement du signal, et sciences de la couleur (440 heures équivalent TD).

- 2001 – 2002 (6 mois) **Ingénieur de recherche** à l'antenne CPE-Lyon du LTSI : *Mesure d'épaisseur de colles fluorescentes par imagerie assistée par modèle.*
- 1999 – 2000 (12 mois) **Année de césure** à Hitachi Central Research Labs, Kokubunji, Tôkyô, Japon : *Sonde médicale à ultrasons focalisés - modèle de propagation de la seconde harmonique.*

C.3. Activités de recherche

Les références mentionnées ci-dessous se trouvent dans l'annexe B.

Parcours

Mes recherches ont commencé au Laboratoire de Systèmes Périphériques de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne sur la réflexion angulaire de la lumière sur supports métalliques vernis (stage de D.E.A, 2001) puis sur la formalisation mathématique des modèles à deux flux, soit par graphe ou chaîne de Markov (doctorat, 2002–2006), soit par matrices de transfert de flux (post-doctorat, 2006–2009), en vue de prédire les facteurs spectraux de réflexion et de transmission de supports imprimés en demi-ton (doctorat, imprimés recto-verso, empilés, ou revêtus par des couches non-minces).

Depuis mon arrivée au Laboratoire Hubert Curien en 2009, je m'intéresse à la valorisation de ces modèles dans la conception d'effets visuels innovants par impression, aux nouveaux procédés d'impression par marquage laser, aux difficultés métrologiques associées aux surfaces colorées spéculaires, et à la prédiction du rendu visuel de supports à apparence complexe comme les textiles. Ces travaux se sont inscrits dans le groupe de recherches ERIS commun au Laboratoire Hubert Curien et à l'Institut d'Optique Graduate School (2009-2014), puis dans le projet "Modèles macroscopiques d'image de surfaces" que j'anime depuis janvier 2015. Ils font l'objet de collaborations régulières avec des institutions de recherche académiques (École Nationale des Mines de Saint-Etienne, Institut P' à Poitiers, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne) et des centres de recherche industriels (Gemalto – projet européen, Arjowiggins – brevet commun [B5]).

Faits marquants

- 2006 • Publication du premier modèle prédictif de la couleur d'imprimés en demi-ton vus en transmission [A20].
- 2011 • Publication d'une méthode de représentation des couleurs goniochromatiques [A11].
 - Réalisation du premier imprimé conçu grâce à un modèle affichant deux images différentes en mode réflexion (éclairage par l'avant) et transmission (éclairage par l'arrière).
- 2012 • Première réalisation d'un schéma de cryptographie visuelle basé sur un empilement de films imprimés multicolores, révélant un message à couleur uniforme et secrète.
- 2015 • Parution de trois chapitres [B1, B2, B3] dans l'ouvrage collectif en trois volumes *Handbook of Digital Imaging*, Ed. Mickael Kriss, Wiley (Fev. 2015) dont un sélectionné comme extrait en libre accès sur la page commerciale de l'ouvrage [B1].
 - Présentation du premier modèle prédictif de l'effet de bronzage sur les encres [C6].
 - Présentation de la première simulation de changement de couleur de textiles préservant la texture de brillant [C7].

Responsabilités scientifiques

- **Responsable du projet** « Modélisation macroscopique d'images de surfaces » dans la thématique *Formation, compréhension et analyse de l'image* du département *Informatique Télécom & Image* du Laboratoire Hubert Curien, UMR 5516 CNRS et Université Jean Monnet. Équipe de 6 membres permanents, et 3 doctorants et 1 post-doctorant en juin 2015.
- **Responsable du projet** « Surfaces à apparence variable » dans l'axe *Perception Engineering & White Light Processing* du Laboratoire d'Excellence Manutech-SISE (ANR-10-LABX-0075).

Responsabilités dans des programmes financés nationaux et internationaux

- **Contrat européen Euripidès EURO-09-801 "COSEC_ID" (2010-2014)** de 36 mois et 5,46 millions d'euros, porté par Gemalto (France et Finlande), avec le Laboratoire Hubert Curien (Saint-etienne), le CInaM (Marseille), l'Université de Dublin, l'Institut d'Optique graduate-School et la société NBS (Aix-en-Provence), sur le développement de solution de caractérisation et de sécurisation des images personnalisées imprimées dans les cartes à puces et cartes d'identité. → Responsable de la tâche « Visual rendering modelling and printing quality characterization », comprenant 48 hommes-mois.
- **Contrat de l'Agence Nationale de la Recherche ANR-12-NANO-0006 "Photoflex" (2013-2017)** de 48 mois et 1,1 million d'euros, porté par le Laboratoire Hubert Curien (Saint-Etienne) avec l'Institut P' (Poitiers), le LGP2 (Grenoble), Armines SMS (Saint-Etienne) et l'entreprise HEF (Saint-Etienne), sur l'inscription par laser de couleurs sur des supports souples enduits de TiO₂/Ag par croissance de nanoparticules d'argent plus ou moins ordonnées. → Responsable de la tâche « Calibration and visual rendering assessment » comprenant 68 hommes-mois.

Rayonnement scientifique et adhésions

- Membre du comité de programme de la conférence internationale « Measuring, modeling, and reproducing material appearance », Electronic Imaging Symposium 2016 à San Francisco, U.S.A, porté par la société IS&T.
- Communication invitée au workshop international *Computational Color Imaging Workshop CCIW'2015* (cf. section Publications).
- Communication invitée au workshop international *Workshop on Information Optics WIO'2015* (cf. section Publications).
- Membre de la société savante **Imaging Science and Technology** (IS&T) depuis 2015.
- Membre du comité d'administration du **Groupe Français de l'Imagerie Numérique Couleur** (GFINC) depuis 2015.
- Membre de l'association de jeunes chercheurs **Color Expert Association** (2003-2009).

Jury de thèse et comité de sélection

- Membre du comité de sélection pour le recrutement d'un maître de conférences à PAGORA, Grenoble, 19 avril 2012.
- Membre du jury de thèse de doctorat de Michel Goeb, « Modèles géométriques et mesures d'ensembles de cercles contraints », Université Jean Monnet. de Saint-Etienne, 2 décembre 2008.

C.4. Encadrement de jeunes chercheurs

Stages de Master et de fin d'études d'ingénieur

- **Albane Borocco**, Institut d'Optique Graduate School et Chanel, avril – septembre 2015.
Mesure et modèles de la réflexion lumineuse par la peau maquillée.
- **Fabrice Rousselle**, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, mars – septembre 2009.
Modèle de diffusion lumineuse pour le papier encre en fonction de l'absorbance des encres, [1 article, A13].
- **Jean-Marc Comby**, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, mars – août 2009.
Modélisation de l'interface air-papier par une approche Monte-Carlo.
- **Guillaume Noyel**, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, mars – septembre 2005.
Modélisation de l'interaction entre la lumière, l'encre et le papier par le modèle de Rogers.

Doctorants et post-doctorants

- **Renée Charrière**, post-doctorat au Laboratoire Hubert Curien financé par le Labex Manutech-SISE, janvier 2012 – juillet 2013 (18 mois).
Sujet : Caractérisation de supports nano-inscrits par laser.
Publications : 1 article en RICL [A7], 1 acte de conférence internationale [C13].
- **Jacques Machizaud**, thèse au Laboratoire Hubert Curien financée par l'école doctorale SIS, 2009 – 2012, soutenue le 27 septembre 2012. Directeur : Thierry Fournel, co-directeurs : Pierre Chavel et Mathieu Hébert (25%).
Titre : Cryptographie visuelle pour l'authentification de documents.
Publications : 2 articles [A9,A8], 1 acte de conférence [C14] et 1 brevet [B5].
- **David Nébouy**, thèse CIFRE au Laboratoire Hubert Curien avec Gemalto, depuis novembre 2012. Directeur : Thierry Fournel, co-directeur : Mathieu Hébert (50%).
Sujet : Qualité d'images imprimées.
Publications : 1 article [A2], 2 actes de conférences internationales [C2, C10].
- **Serge Mazauric**, thèse au Laboratoire Hubert Curien financée sur contrat avec Arjowiggins, démarrée en octobre 2013. Directeur : Thierry Fournel, co-directeur : Mathieu Hébert (50%).
Sujet : Impression assistée par modèles optiques pour la sécurisation de documents.
Publications : 2 articles [A3, A1], 1 article soumis [AS1], 3 actes de conférences internationales [C1, C2, C4].
- **Juan Martinez**, thèse au Laboratoire Hubert Curien financée par contrat ANR, démarrée en octobre 2013. Directeur : Alain Trémeau, co-directeur : Mathieu Hébert (50%).
Sujet : Rendu visuel de surfaces nanostructurées par marquage laser.
Publications : 3 actes de conférences internationales [C5, C8, C13].
- **Laure Alston**, thèse au Laboratoire Créatis, Lyon, financée par le Labex Primes', démarrée en octobre 2014. Directeur : David Rousseau, co-directeurs: Bruno Montcel et Mathieu Hébert (25%).
Sujet : Neurochirurgie guidée par l'imagerie : imagerie optique et de fluorescence pour l'assistance peropératoire en neurochirurgie.

C.5. Activités d'enseignement

Responsabilités pédagogiques

- Depuis 2010 Responsable pédagogique de la deuxième année d'ingénieur sur le site de St-Etienne de l'IOGS.
Membre du Conseil de Formation de l'IOGS.
- Depuis 2013 Responsable du parcours « IOGS » du master « Optique-Image-Vision » de l'Université Jean Monnet de Saint-Etienne.
Membre du conseil de perfectionnement du master Optique-Image-Vision.
- Depuis 2013 Membre du conseil de perfectionnement du CFA de l'IOGS.
- 2011-2014 Membre du Comité Consultatif de Sélection pour le recrutement à l'IOGS.

Disciplines enseignées

- Depuis 2010 **à l'IOGS** : Colorimétrie* (CM, TD), Photométrie* (CM, TD), Modèles optiques pour les surfaces colorées* (CM, TD, TP), projets d'étudiants, communication scientifique. (*enseigné en anglais.)
- 2005 – 2009 **à l'EPFL** : Radiométrie (CM), Colorimétrie (TP).
- 2002 – 2006 **à CPE-Lyon** : Colorimétrie (CM), Géométrie projective (CM), Analyse numérique (TD), Probabilités (TD), Matlab (TD), Traitement du signal (TP).

Encadrement d'étudiants

- Encadrement d'environ 120 **projets d'étudiants** :
à l'EPFL — env. **15** mini-projets de 40h ;
à l'IOGS — **20** projets optique/image de 20h à 32h, **4** projets optique/image de 80h, **83** projets de rendu visuel et tramage d'images (2 actes de conférence internationale [C7,C6]).
- Tutorat académique de **3 apprentis** de l'IOGS (depuis 2012).
- Accompagnement de **2 projets de fin d'études** d'étudiants en restauration du patrimoine à l'Ecole de Condé pour leurs analyses scientifiques (2014 et 2015), du **projet de fin d'études** d'une étudiante en création textile à l'Ecole Duperré (2016) et de plusieurs TIPE (classes préparatoires).

C.6. Diffusion des connaissances

Interactions avec l'industrie

- Membre du Comité d'organisation des journées thématiques sur la couleur par le Pôle Optique Rhône-Alpes (depuis 2010).
- Membre du Consortium Design Enseignement Supérieur à Saint-Etienne.
- Conseiller scientifique auprès d'entreprise du domaine industriel du luxe.

Séminaires pour les professionnels de l'industrie

- “Surfaces : comment se mélangent les couleurs” Journée thématique du Pôle Optique Rhône-Alpes “Fonctionnalisation de Surfaces et Caractérisation”, Saint-Etienne, 29 janvier 2015.

- “*Modéliser, caractériser et mesurer le rendu visuel d’objets colorés*”, Journée thématique du Pôle Européen de la céramique “Décoration céramique et verre pour le luxe”, Limoges, 20 novembre 2014.
- “*Modéliser, caractériser et mesurer le rendu visuel de surfaces*”, Journée thématique du Pôle Optique Rhône-Alpes “Fonctionnalisation de Surfaces et Caractérisation », Saint-Etienne, 5 juin 2014.
- “*Prédire le rendu des couleurs*”, Séminaire au Quartier Créatif de la ville de Saint-Etienne, 14 mars 2014.
- “*Notions de photométrie et de colorimétrie pour l’éclairage*”, Demi-journée thématique du Cluster Lumière “L’optique dans l’éclairage LED », Lyon, 27 novembre 2012.
- “Apparence des surfaces colorées - Savoir-faire, enjeux et perspectives”, Séminaire du Labex Manutech-SISE, 26-28 septembre 2011.
- “*Couleur des Images sur Papier*” Séminaire de l’association Color Expert Association, École Nationale Supérieure de la photographie d’Arles, 6 juillet 2007.
- “*Compositional model for predicting multilayer reflectances and transmittances in color reproduction*” séminaires chez Gretag McBeth (Regensdorf, Suisse) le 13 septembre 2006, puis à l’EMPA (Duberdorf, Suisse) le 14 septembre 2006.

Séminaires pour le grand public et les jeunes

- “*Grandes œuvres d’art : ce qu’on découvre grâce à la science*”, séminaires présentés aux collégiens et lycéens de Lyon participant au programme “Art et Sciences” animé par la compagnie de danse Compagnie Hallet Eghayan le 19 mars 2015, puis aux collégiens de la Loire participant à la fête de la science à Saint-Etienne, 26 mars 2015.
- “*La couleur des grandes œuvres artistiques – L’art de sculpter la lumière*”, cycle de 6 conférences dans le cadre de l’Année de la Lumière (UNSECO), pour le grand public (bibliothèque du 9^{ème} arrondissement de Lyon), des collégiens et lycéens (Lycées de Lyon et de Trévoux et collégiens de la Loire), des étudiants et des chercheurs (Maison de l’Université de St-Etienne, et Ecole Centrale de Lyon), mai – décembre 2015.
- “*Optique et Art*”, “*Optique, Image, Apparnce*”, séminaires d’accueil pour les étudiants entrant à l’Institut d’Optique à Palaiseau, en 2011, 2013 et 2015.
- “*Le Visible Human*”, stand d’animation scientifique du Laboratoire des Systèmes Périphériques (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne) à la Nuit de la Science à Genève, 5-6 juillet 2008.

Organisation de stages et congrès

- Membre du comité de programme de la conférence internationale “Measuring, modeling, and reproducing material appearance”, Electronic Imaging Symposium 2016 à San Francisco, U.S.A, porté par la société IS&T.
 - Membre du comité technique et du comité de programme des “Journées optique et numérique” de l’IOGS, Talence, 27-28 mai 2015.
 - Organisateur et animateur du stage “*Interaction de la lumière et des surfaces multicouches colorées*” à destination d’enseignants de classes préparatoires aux grandes écoles, agréé par l’association LIESSE, à l’IOGS, Saint-Etienne, 16-17 mai 2011.
- Organisateur de la journée scientifique nationale “*Surfaces diffusantes*”, Saint-Etienne, 24 avril 2003.